

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Под редакцией И.П. Копылова

В ДВУХ КНИГАХ
КНИГА 2

2-е издание, переработанное
и дополненное

Рекомендовано Комитетом по высшей школе
Министерства науки, высшей школы и технической
политики Российской Федерации в качестве учебника
для студентов вузов, обучающихся по специальности
"Электромеханика"



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1993

ББК 31.261

П79

УДК 621.313.001.2/3 (075.8)

Авторы: И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин,
Б. Ф. Токарев

Рецензент кафедры электрических машин ЛПИ им. М. И. Калинина
(С.-Петербургский Государственный технический университет)

Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов. –
П79 В 2-х кн.: Кн. 2/ И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Мороз-
кин, Б. Ф. Токарев; Под ред. И. П. Копылова. – 2-е изд., пе-
рераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.: ил.

ISBN 5-283-00725-1

Рассмотрены электромагнитные, тепловые, вентиляционные и меха-
нические расчеты асинхронных, синхронных машин и машин постоян-
ного тока. Во втором издании, выходящем в двух книгах, приведены
примеры расчетов электрических машин новых серий. Даны необходи-
мые справочные материалы для выполнения курсовых и дипломных
проектов. Первое издание вышло в 1980 г.

Для студентов электротехнических и энергетических специаль-
ностей. Может быть полезна инженерам, специализирующимся в области
проектирования электрических машин.

П-2202070100-061 64-91
051 (01)-93

ББК 31.261

ISBN 5-283-00725-1 (кн. 2)
ISBN 5-283-00669-7

© Издательство "Энергия", 1980
© Авторы, 1993, с изменениями

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Синхронные машины имеют широкое распространение и выпускаются в большом диапазоне мощностей и частот вращения. В энергетике их применяют в качестве генераторов на электростанциях, и мощность их доходит до 1200 МВт для турбогенераторов и 640 МВт для гидрогенераторов. В промышленных установках большое применение находят синхронные двигатели и генераторы.

Синхронные двигатели предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, таких, как компрессоры, насосы, шаровые мельницы, вентиляторы, двигатель-генераторные установки и т. п.

Двигатели изготовляют как с неявнополюсным, так и с явнополюсным ротором.

В неявнополюсном исполнении синхронные двигатели — турбодвигатели — выпускают с частотой вращения 3000 об/мин на мощности от 630 до 12 500 кВт. Более широкое распространение имеют явнополюсные синхронные двигатели с диапазоном частот вращения от 1500 до 100 об/мин при мощностях от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч киловатт.

Шкала мощностей выпускаемых в настоящее время двигателей дана в табл. 9.1. Двигатели выпускают с номинальными напряжениями 380, 660, 6000 и 10 000 В.

В отдельных случаях допускается изготовление двигателей на напряжение 3000 В для мощностей, указанных в таблице для двигателей с номинальным напряжением 6000 В.

Синхронные генераторы выполняют с явнополюсными роторами и применяют в сопряжении с двигателями внутреннего сгорания или электродвигателями. В табл. 9.2 приведена шкала мощностей, частот вращения и напряжений для синхронных генераторов. Для дизель-агрегатов выпускают генераторы с частотой вращения 375 об/мин. Кроме того, выпускают синхронные генераторы небольших мощностей: от 4 до 100 кВт. Большинство выпускаемых генераторов работает с самовозбуждением и автоматической системой регулирования возбуждения.

Таблица 9.1. Шкала мощностей синхронных двигателей

Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин									
	3000			1500			1000			
	6000	10 000	380	660	6000	10 000	380	660	6000	10 000
Номинальное напряжение, В										
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
132	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
160	-	-	X	X	-	-	X	X	-	-
200	-	-	X	X	-	-	X	X	-	-
250	-	-	X	X	X	-	X	X	X	-
315	-	-	X	X	X	-	X	X	X	-
400	-	-	-	X	X	-	-	-	X	-
500	-	-	-	X	X	-	-	-	X	-
630	X	X	-	-	X	-	-	-	X	X
800	X	X	-	-	X	X	-	-	X	X
1000	X	X	-	-	X	X	-	-	X	X
1600	X	X	-	-	X	X	-	-	X	X
1250	X	X	-	-	X	X	-	-	X	X
2000	X	X	-	-	X	X	-	-	X	X
2500	X	X	-	-	X	X	-	-	X	X
3200	X	X	-	-	X	X	-	-	X	X
4000	X	X	-	-	X	X	-	-	X	X
5000	X	X	-	-	X	X	-	-	X	X
6300	X	X	-	-	-	-	-	-	X	X
8000	X	X	-	-	-	-	-	-	X	X
10000	X	X	-	-	-	-	-	-	X	X
12500	X	X	-	-	-	-	-	-	X	-

Продолжение табл. 9.1

Номи- нальная мощ- ность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин																			
	600					375					300					250				
	Номинальное напряжение, В																			
	380	6000	10 000	380	6000	10 000	6000	10 000	6000	10 000	6000	10 000	6000	10 000	6000	10 000				
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
90	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
110	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
132	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
160	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
200	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
250	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
315	X	X	-	-	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-				
400	-	X	-	-	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-				
500	-	X	-	-	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-				
630	-	X	X	-	X	X	X	-	-	-	X	X	-	-	-	-				
800	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	-	-	-				
1000	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	-	-				
1600	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-				
1250	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-				
2000	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-				
2500	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-				
3200	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-				
4000	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-				
5000	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-				
6300	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-				
8000	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-				
10 000	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-				
12 500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				

Таблица 9.2. Шкала мощностей синхронных генераторов

Номи- наль- ная мощ- ность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин											
	1500			1000			750		600		500	
	Номинальное напряжение, В											
	230	400	6300	230	400	6300	230	400	400	230	400	
75	—	—	—	X	X	—	X	X	—	—	—	
100	X	X	—	X	X	—	X	X	—	—	—	
125	—	X	—	X	X	—	—	—	X	X	X	
160	—	X	—	—	—	—	X	X	X	X	X	
200	X	X	—	—	—	—	X	X	X	X	X	
250	—	—	—	—	—	—	X	X	X	—	X	
320	—	X	—	—	X	X	—	—	—	—	X	
400	—	X	—	—	X	—	—	—	—	—	—	
500	—	X	X	—	X	X	—	—	—	—	—	
630	—	X	X	—	X	X	—	X	—	—	—	
800	—	—	—	—	—	X	—	—	—	—	—	

Широкий выпуск имеют различного типа синхронные двигатели мощностью от нескольких сотен ватт до долей ватта (микродвигатели).

Расчет синхронных машин каждого вида имеет свои особенности. В этой главе изложена методика расчета синхронных явнополюсных машин общего назначения.

Основное конструктивное исполнение таких машин — с горизонтальным расположением вала. По способу защиты и вентиляции — защищенные или закрытые с самовентиляцией. Охлаждение — воздушное.

В настоящее время для синхронных машин не существует жесткой увязки мощностей с установочными размерами и высотой оси вращения, как это имеется, например, у асинхронных машин.

Синхронные машины общего назначения выпускают в виде ряда серий. Каждая серия включает в себя машины в определенном диапазоне мощностей и частот вращения, их выполняют на нескольких нормализованных внешних диаметрах статора, которые определяют габарит машины. При одной и той же частоте вращения две—четыре машины близких мощностей имеют одинаковую поперечную геометрию и отличаются длиной.

В настоящее время неявнополюсные синхронные двигатели общего назначения выпускают сериями СД2, СДН2, СДН3-2 и др. Серию двигателей СД2 выполняют на внешних диаметрах статора, соответствующих 13-му и 14-му габаритам, серию СДН2 — на диаметрах 16-го и 17-го га-

баритов, а серию СДНЗ-2 – на диаметрах 18–21-го габаритов. Синхронные генераторы выпускают сериями СГ2 (13-й и 14-й габариты), СГД2 (16-й и 17-й габариты) и др. Конструктивно синхронные генераторы подобны синхронным двигателям соответствующего габарита. Кроме того, выпускают синхронные генераторы серий ОС, ЕСС, ЕСС5 и другие в диапазоне мощностей от 4 до 100 кВт (5–9-й габариты) на напряжения 230 и 400 В при частоте вращения 1500 об/мин.

9.2. КОНСТРУКЦИЯ СЕРИЙНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Как уже отмечалось, синхронные машины общего назначения с явно-полюсным ротором выпускают в виде отдельных серий. Каждая серия включает ряд машин в определенном диапазоне мощностей, объединенных общностью конструкции. Машины различных серий могут конструктивно отличаться друг от друга, но наряду с этим в выполнении отдельных узлов иметь и много общего. Конструкции современных синхронных машин средней мощности показаны на рис. 9.1–9.3. На рис. 9.4 показан внешний вид некоторых машин. На рис. 9.1–9.3 одинаковые детали и узлы обозначены одинаковыми цифрами.

Конструктивно машины указанных серий выполнены с различными степенями защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями и от попадания внутрь машины посторонних тел и воды. В соответствии с классификацией, предусмотренной ГОСТ 17494-87, машины серии СД2 (СГ2) имеют степень защиты IP23. Основное исполнение серии СДН2 имеет степень защиты IP11, но также имеется модификация со степенью защиты IP43. Машины серии СДНЗ-2 имеют закрытое исполнение со степенью защиты IP44.

Машины различаются по способу крепления и конструкции подшипниковых узлов. В машинах серии СД2 (СГ2) подшипники размещают в подшипниковых щитах, и, следовательно, машины имеют форму исполнения IM1001. В машинах серий СДН2 и СДНЗ-2 применяют стоячковые подшипники, и они имеют форму исполнения IM7311. Машины серии СДН2 (рис. 9.2) выполняют без фундаментной плиты, а стоячковые подшипники 1 устанавливают на нижних подшипниковых полу-щитах 2, крепящихся к нижней части статора. Такое исполнение позволило сократить расстояние между подшипниками по сравнению с вариантом крепления стоячковых подшипников на фундаментной плите, и привело к уменьшению общей массы машины. По сравнению с вариантом расположения подшипников в подшипниковых щитах принятая конструкция также имеет преимущества, так как обеспечивает выполнение машины на подшипниках скольжения и качения с одинаковыми габаритно-установочными размерами, большую гарантию от попадания масла из подшипников скольжения в машину, уменьшает вероятность

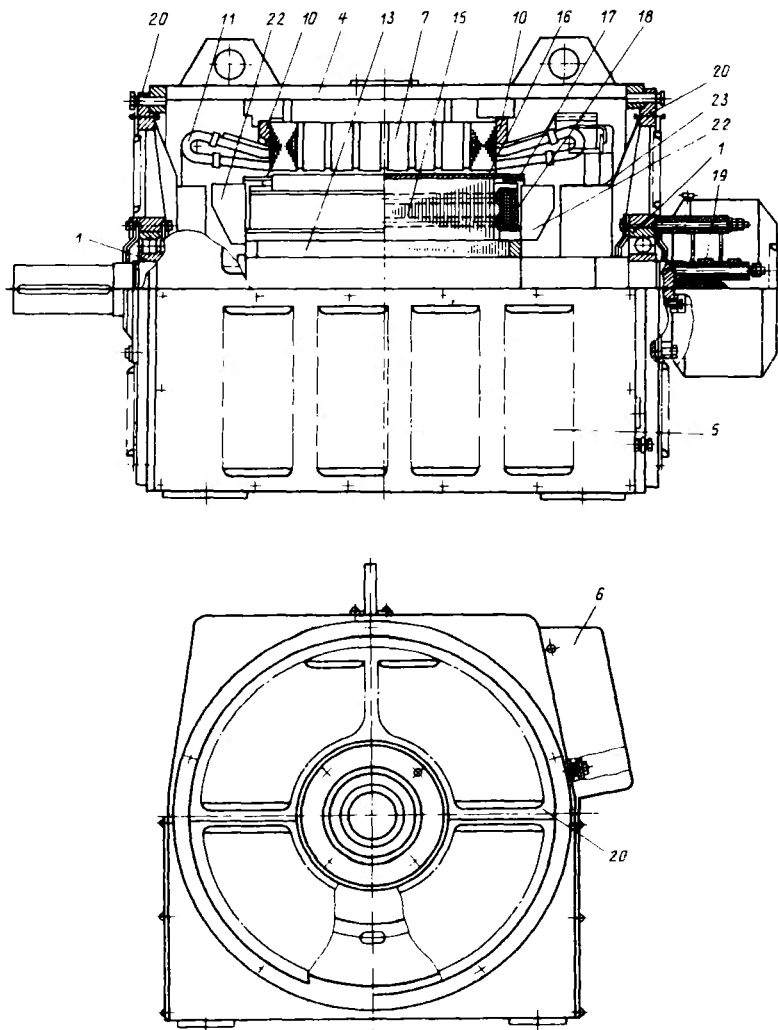


Рис. 9.1. Синхронный двигатель серии СД2

возникновения вибраций и т. д. Крепление двигателей к фундаменту производят шпильками, проходящими через отверстия в лапах станины. Двигатели серии СДНЗ-2 (рис. 9.3) вместе со стоячковыми подшипниками 1 крепят на фундаментной плите 3 или фундаментных балках.

В машинах серии СД2 применяют подшипники качения: со стороны контактных колец — однорядные шариковые подшипники и со сторо-

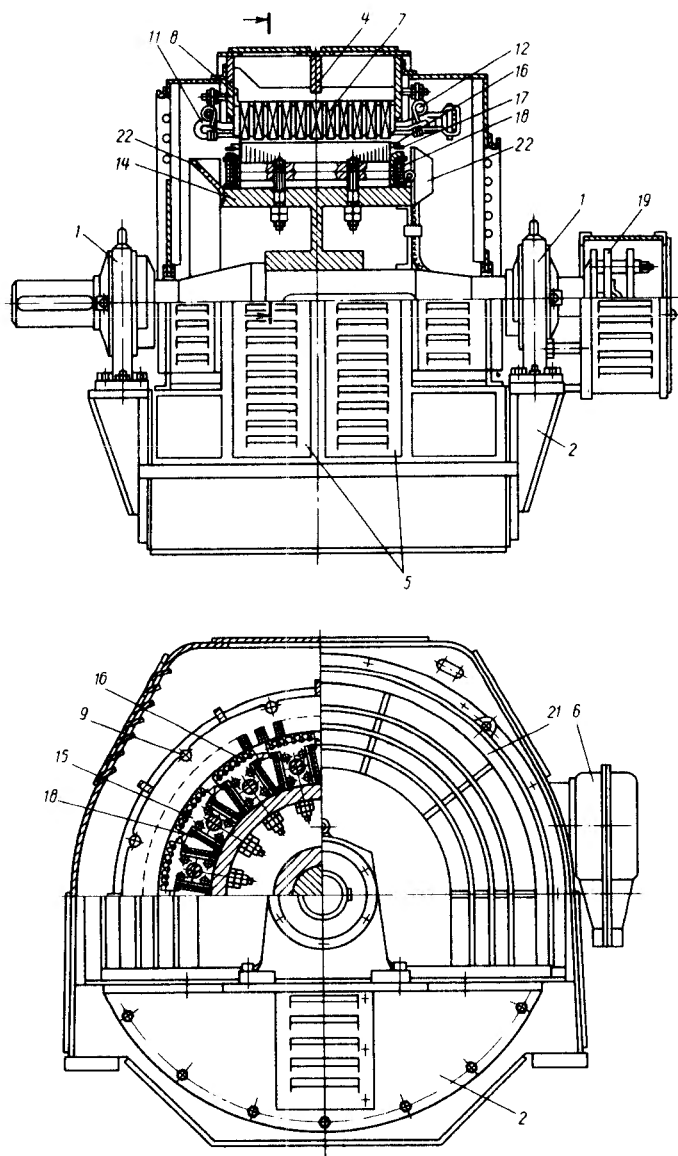


Рис. 9.2. Синхронный двигатель серии СДН2

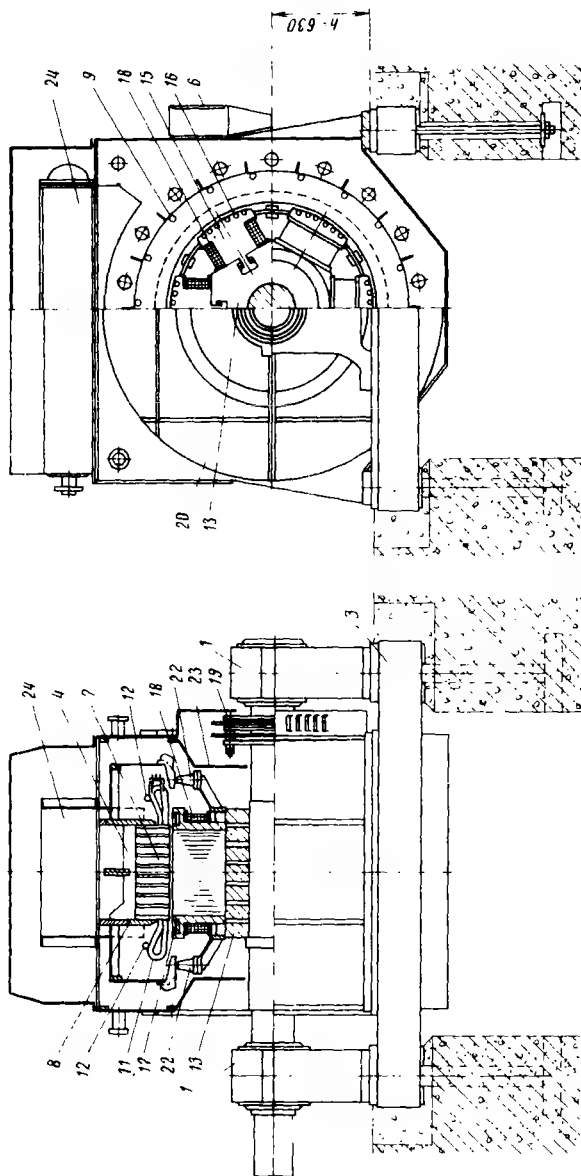
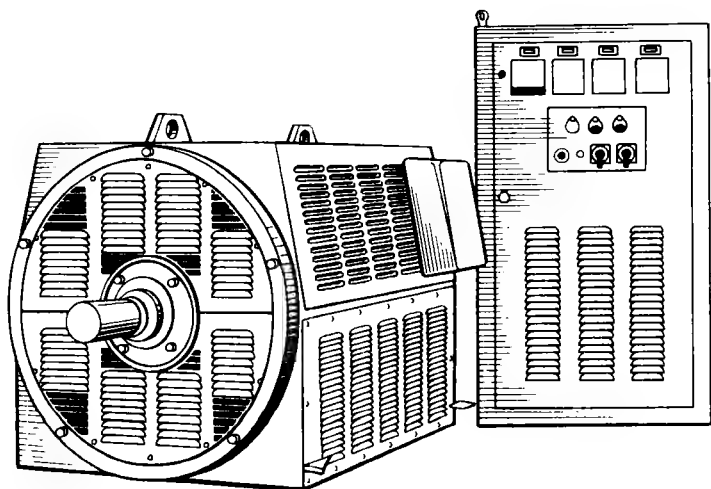
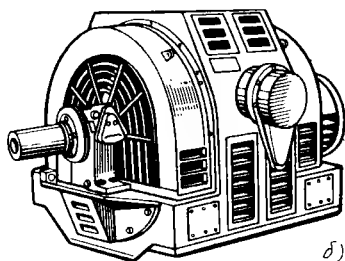


Рис. 9.3. Синхронный двигатель серии СДНЗ-2



а)



б)

Рис. 9.4. Внешний вид синхронных двигателей:

а – СД2; б – СДН2

ны привода – однорядные роликовые. В машинах серии СДН2 могут быть применены как подшипники скольжения, так и подшипники качения. Подшипники скольжения – стояковые с кольцевой смазкой. У применяемых подшипников сокращена осевая длина за счет отсутствия маслоуловительных козырьков. Для подшипников качения используют роликовые однорядные подшипники. В комплект подшипникового узла со стороны привода вместе с роликовым подшипником входит шариковый подшипник, который предназначен для восприятия случайных осевых нагрузок. Все машины серии СДН3-2 имеют подшипники скольжения.

Высота оси вращения для всех машин серий СДН2 и СДН3-2 равна 630 мм, а для машин серии СД2 (СГ2) – 450 мм у машин 13-го габарита и 500 мм у машин 14-го габарита.

Станины 4 всех машин сварные из листовой стали и состоят из стоек, соединенных между собой продольными ребрами жесткости, опорных лап и наружной обшивки. У машин серий СД2 и СДН2 в обшивке корпуса имеются окна 5 с жалюзи и решетками для выхода воздуха. У машин серии СДН3-2 обшивка корпуса глухая, в днище корпуса имеются окна для присоединения воздухопроводов. На станине закрепляют коробку выводов статора с крышкой 6. Сердечник статора 7 состоит из запрессованных в корпус станины пакетов, собранных из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Между пакетами имеются вентиляционные каналы. В машинах серии СД2 пакеты собирают из целых листов, а у машин серий СДН2 и СДН3-2 — из сегментов. У машин серий СДН2 и СДН3-2 удержание магнитопровода в запрессованном состоянии обеспечивают нажимные кольца 8 и стяжные шпильки 9, а у машин СД2 (СГ2) — нажимные шайбы 10, соединенные между собой стяжками. Во всех машинах применена двухслойная петлевая обмотка 11, которую укладывают в прямоугольные пазы статора. У машин серии СД2, а также у генераторов серий СГ2 и СГД2 в эти же пазы укладывают по одному проводнику дополнительной обмотки, предназначенной для питания возбуждательного устройства. Пазовую часть обмотки крепят гетинаксовыми клиньями. Лобовые части обмотки в зависимости от вылета и глубины паза крепят изолированными бандажными кольцами 12.

Роторы машин имеют два исполнения. У быстроходных машин полюсы сажают на остов, а у тихоходных — на магнитное колесо. Остов ротора 13 (см. рис. 9.3) выполняют шихтованным из листовой стали марки Ст3. У машин 13—17-го габаритов остов состоит из одного пакета, а у машин, начиная с 18-го габарита, подразделяется на несколько пакетов длиной 100 мм с промежутками между ними в 15—25 мм. Магнитное колесо 14 (см. рис. 9.2) выполняют сварным из листовой стали марки Ст3.

Полюсы быстроходных машин крепят к остоу ротора Т-образными хвостовиками, а в некоторых машинах — хвостовиками в виде ласточкина хвоста. Полюсы тихоходных машин крепят к ободу магнитного колеса шпильками и гайками.

Сердечники полюсов 15 выполняют шихтованными из листовой стали марки Ст3 толщиной 1 и 1,4 мм. Запрессовку сердечника полюса осуществляют с помощью литых нажимных щек и заклепок. Сердечники полюсов бесхвостового исполнения имеют массивный центральный стержень, в который заворачивают крепящие полюс шпильки.

Демпферную (пусковую) клетку 16 выполняют из медных стержней, расположенных в полукруглых пазах сердечников полюсов, припаянных к дугообразным сегментам 17 и выполненных из полосовой меди, гнутой плашмя. У некоторых двигателей часть пазов заполняют латунными стержнями. Соединение короткозамыкающих сегментов соседних полюсов быстроходных машин производят встык с помощью

соединительных накладок с дополнительным креплением соединения шпилькой к остову ротора. Короткозамыкающие сегменты тихоходных машин соединяют между собой внахлест.

Обмотки возбуждения 18 состоят из катушек, изготовленных из голой полосовой меди, намотанной на ребро. Между витками прокладывают изоляцию из асбестовой бумаги.

Контактные кольца 19 подвесного типа изготавливают из стали марки Ст3 или чугуна и крепят на конце вала за подшипниковым узлом у машин 13–17-го габаритов и между подшипниковыми стойками у машин, начиная с 18-го габарита (серия СДН3-2).

Подшипниковые щиты 20 у машин серии СД2 (СГ2) (см. рис. 9.1) сварные, которые центрируют замками в станине. В щитах имеются окна с жалюзи, через которые входит охлаждающий машину воздух. В серии СДН2 (см. рис. 9.2) нижние подшипниковые полуштиты 2 в машинах 16-го габарита изготавливают литыми из чугуна, а у машин 17-го габарита приняты сварные полуштиты. В полуштитах предусматривают вентиляционные окна, служащие также для измерения воздушного зазора. Предохранительные щиты 21 прикрепляют к верхним торцевым частям станины, и их конструкция определяется необходимостью обеспечения заданной степени защиты машины.

При степени защиты IP11 вентиляционные окна, расположенные на цилиндрической поверхности щитов, закрыты жалюзи, окна на торцевых поверхностях — решетками, сваренными из концентрически расположенных круглых прутков и радиальных ребер. Для предотвращения попадания внутрь двигателя воды, стекающей по торцевой поверхности щита, предусмотрены обтекатели. Щиты машин со степенью защиты IP43 отличаются от щитов машин исполнения IP11 только отсутствием вентиляционных окон.

В машинах серии СДН3-2 применяют плоские разъемные щиты 20 (см. рис. 9.3) из листовой стали толщиной 5 мм. Для увеличения жесткости щиты имеют горизонтальные и вертикальные ребра из полосовой стали.

Во всех сериях применяют воздушное охлаждение с самовентиляцией. В машинах серии СД2 принята согласная радиальная система вентиляции. В серии СДН2 применена согласная система вентиляции, причем при активной длине магнитопровода статора меньше 44 см используют аксиально-радиальную схему, а при длинах больше 44 см — радиальную. У закрытых машин серии СДН3-2 вентиляция происходит по замкнутому циклу через встроенный воздухоохладитель 24, который у большинства машин размещают в верхней части корпуса. Схему вентиляции для машин серии выбирают в зависимости от окружной скорости ротора и длины статора. При окружных скоростях ротора более 40 м/с применяют согласную радиальную вентиляцию с осевым вентилятором, при скоростях от 20 до 35 м/с и активной длине статора машины до 40 см — согласную аксиально-радиальную систему с коническим венти-

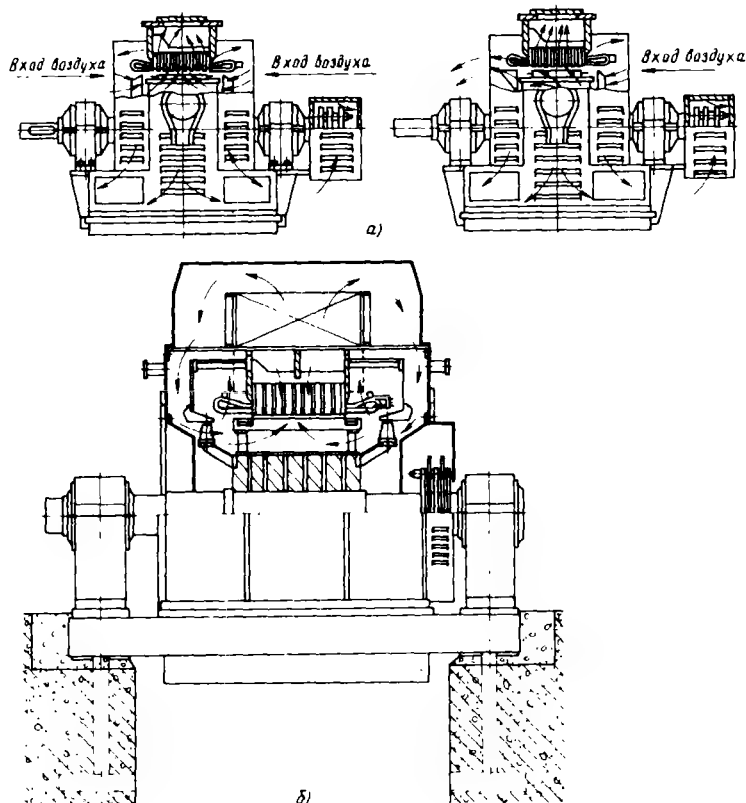


Рис. 9.5. Схемы вентиляции:

а – защищенных машин СДН2; *б* – закрытых машин СДН3-2

лятором, при скоростях от 20 до 30 м/с, но при длине статора свыше 41 см – согласную радиальную с коническим вентилятором. Вентиляторы машин 22 (см. рис. 9.3) прикрепляют к ободу ротора. Для направления потока воздуха к подшипниковым щитам некоторых машин прикрепляют диффузоры 23. На рис. 9.5, *а* в качестве примера показана схема согласной радиальной (левый рисунок) и согласной аксиально-радиальной вентиляции (правый рисунок) для защищенных машин, а на рис. 9.5, *б* – согласной радиальной вентиляции для закрытых машин.

На рис. 9.6, *а* дана конструкция синхронного генератора серии ЕСС, а на рис. 9.6, *б* – его внешний вид. Генераторы изготовляют в горизонтальном защищенном исполнении. По способу крепления и конструкции подшипниковых узлов генераторы имеют две формы исполнения: IM1001 (на лапах с двумя одинаковыми подшипниковыми щитами)

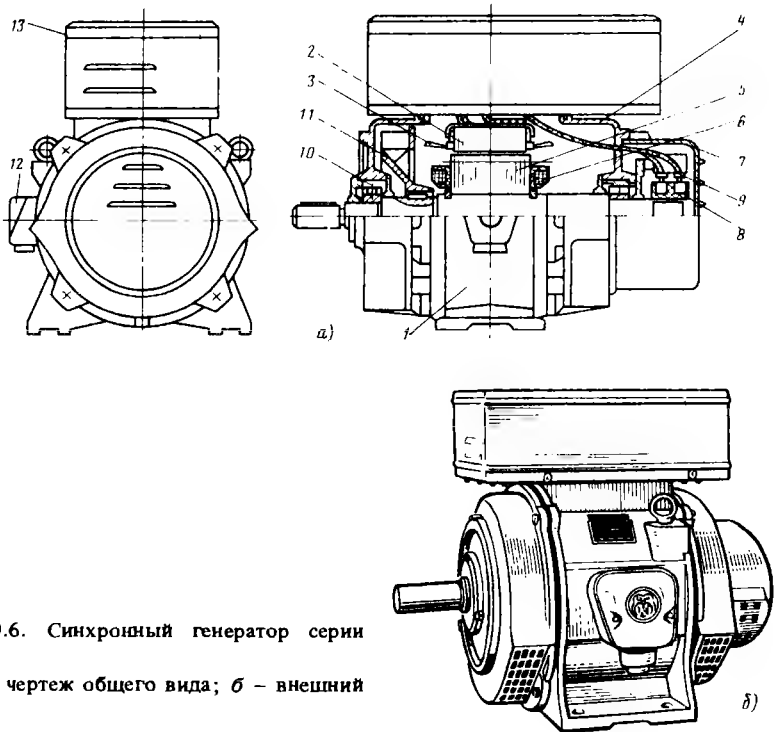


Рис. 9.6. Синхронный генератор серии ЕСС:

а — чертеж общего вида; *б* — внешний вид

и IM2101 (на лапах с фланцевым подшипниковым щитом со стороны вала). Станина генератора *1* — чугунная, литая. В верхней ее части имеется проем прямоугольной формы, над которым устанавливают блок регулирования напряжения *13*. На внутренней поверхности станины равномерно по окружности расположены продольные ребра, на которые сажают обмотанный магнитопровод статора. Каналы, образованные между ребрами и наружной поверхностью статорного магнитопровода, служат для прохождения охлаждающего воздуха. Вентиляция генератора — аксиальная, вытяжная. Воздух забирается центробежным вентилятором *11* через отверстия в щите, расположенном со стороны контактных колец. Подшипниковые щиты *4* — чугунные, литые. В нижних частях щитов расположены окна для прохождения воздуха. Окна защищены сетками, штампованными из листовой стали. Для увеличения размеров окон нижняя часть щитов расширена.

В подшипниковых щитах располагают подшипники *10*. Со стороны привода применяют роликподшипники, а со стороны колец — шарикоподшипники. В генераторах 5-го габарита установлены шарикоподшипники с обеих сторон.

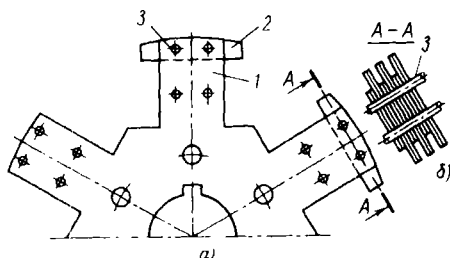


Рис. 9.7. Ротор синхронного генератора серии FCC

Магнитопровод статора 2 собирают из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Собранный в пакет магнитопровод после опрессовки удерживается шестью продольными скобками, которые на торцах приваривают к нажимным кольцам. Магнитопровод впрессовывают в станину и закрепляют от проворачивания винтом.

В полузакрытых пазах статора уложена вспыная петлевая двухслойная обмотка 3 из медного круглого провода марки ПСД. Изоляция обмотки и паза соответствует классу нагревостойкости В.

Сердечник ротора 5 собирают из листов электротехнической стали, которые имеют форму звезды с числом лучей (выступов) 1, равным числу полюсов (рис. 9.7, а). Листы используют двух видов, отличающихся друг от друга высотой выступов. Из той же стали штампуют сегменты 2, имеющие форму полюсных наконечников. По длине сердечник состоит из чередующихся пакетов, состоящих из листов с короткими или длинными выступами. Крайние пакеты с короткими выступами собраны из листов тонколистовой стали толщиной 2 мм.

Собранный и спрессованный магнитопровод закрепляют на валу с помощью шпонки, а с торцов — двумя пружинными кольцами.

Катушки обмотки возбуждения б (см. рис. 9.6, а) наматывают из прямоугольной меди и после предварительной изоляции полюсных сердечников надевают на них. Сверху и снизу катушек устанавливают изолирующие шайбы. Под нижнюю шайбу подкладывают стальную пружинящую рамку, предохраняющую от перемещения катушки относительно сердечника. После установки катушек на полюсы зашпилькают пакеты сегментов полюсных наконечников 2 (рис. 9.7, б). Сегменты с сердечниками крепят с помощью двух продольных шпилек 3, проходящих через отверстия сегментов и высоких пакетов, при этом наружные размеры сегментов и высоких пакетов строго совпадают, образуя внешнюю поверхность ротора. Между сегментами по краям полюсов остаются воздушные промежутки, равные толщине высоких пакетов.

На выступающие из полюсов концы шпилек устанавливают силиконовые втулки, удерживающие торцевые части катушек от изгиба.

Выводные провода обмотки ротора пропускают через вал, конец которого со стороны колец полый (сверленный), и соединяют с контакт-

ными кольцами 8 (см. рис. 9.6, а), изготовленными из латуни. Кольца с контактными шпильками запрессовывают в изоляционном пресс-материале на стальную втулку, которая служит для посадки контактных колец на конец вала. Втулку на валу закрепляют от проворачивания призматической шпонкой, а от осевого смещения — установленным на валу пружинным кольцом. Кольца закрывают штампованным из листовой стали кожухом 7. На подшипниковом щите со стороны колец крепят чугунное кольцо, которое стягивает крышку подшипника. В кольцо ввинчивают одну или две шпильки, опрессованные в изоляционный пресс-материал. На шпильки крепят по две траверсы 9, каждая из которых имеет два щеткодержателя со щетками марки ЭГ-14 размером $10 \times 12,5$ мм. Блок регулирования напряжения 13 устанавливают над проемом в станине. В нем устанавливают выпрямители цепи возбуждения, трансформаторы тока, дроссель цепи компаундирования и конденсаторы для самовозбуждения.

На станине располагают коробку выводов 12 для присоединения внешних проводов.

9.3. СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ

При анализе работы синхронных машин и при построении их характеристик широко используют систему относительных единиц. В этом случае напряжения, ЭДС, сопротивления, мощности и т. д. выражают не в физических единицах, а в величинах, являющихся их отношениями к соответствующему значению, которое принимают за базовое. Обычно для токов и напряжения статора за базовые значения принимают их номинальные фазные значения $I_{\text{ном.ф}}$ и $U_{\text{ном.ф}}$, а для мощности — полную номинальную мощность $S_{\text{ном}} = m U_{\text{ном.ф}} I_{\text{ном.ф}}$. Сопротивления обмоток относят к базовому сопротивлению, равному отношению номинального фазного напряжения к номинальному фазному току. За базовый момент принимают отношение $M_b = S_{\text{ном}} / \Omega_{\text{ном}}$ ($\Omega_{\text{ном}}$ — угловая синхронная скорость).

Для того чтобы выразить в относительных единицах величины и параметры роторных контуров, их нужно предварительно привести к числу витков обмотки статора, а затем разделить на соответствующее указанное выше базовое значение этой величины.

В обозначении величин, выраженных в относительных единицах, в нижнем индексе указывается звездочка. Так, ток в относительных единицах будет обозначаться I_* , индуктивное сопротивление x_* и т. д.

Применение относительных единиц делает анализ работы машины более наглядным и обобщенным.

9.4. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

При разработке электрической машины задаются рядом исходных величин, которые будут являться номинальными данными спроектиро-

ванной машины. Для синхронной машины такими данными являются следующие.

1. Номинальная мощность. Для двигателей этой мощностью является механическая мощность на валу $P_{\text{ном}}$ в киловаттах. Иногда еще задается полная мощность $S_{\text{ном}}$ в киловольт-амперах. Для генераторов за номинальную мощность принимается электрическая отдаваемая мощность $S_{\text{ном}}$ в киловольт-амперах, а также ее активная составляющая $P_{\text{ном}}$ в киловаттах.

2. Номинальное линейное напряжение $U_{\text{ном}}$, В или кВ.

3. Число фаз и схема соединения обмотки статора (звезда или треугольник). Чаще всего применяется схема соединения звезда.

4. Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, об/мин.

5. Частота f , Гц.

6. Коэффициент мощности $\cos \varphi$. Обычно $\cos \varphi = 0,9$ при опережающем токе для двигателей и $0,8$ при отстающем для генераторов.

Кроме того, в некоторых случаях могут быть заданы некоторые дополнительные данные: момент инерции J , система вентиляции, пусковые условия, конструктивный тип и т. д.

Серии синхронных машин общего назначения в Советском Союзе выпускались чаще всего в защищенном исполнении с горизонтальным расположением вала. Поэтому в приведенной ниже методике расчета будут рассматриваться машины такого типа.

9.5. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Проектирование синхронных машин, как, впрочем, и любой другой электрической машины, начинают с выбора главных размеров: внутреннего диаметра статора D и расчетной длины l_δ . Задача эта не имеет однозначного решения, так как при выборе главных размеров приходится учитывать ряд требований. Поэтому для нахождения оптимальных значений D и l_δ приходится в некоторых случаях просчитывать ряд вариантов. Для сокращения числа рассчитываемых вариантов целесообразно воспользоваться рекомендациями, полученными на основе накопленного опыта проектирования и эксплуатации подобных машин. Для предварительного определения диаметра можно воспользоваться построенными в логарифмическом масштабе зависимостями $D = f(S')$ (рис. 9.8), которые соответствуют усредненным диаметрам выполненных машин.

Расчетную электромагнитную мощность $S'_{\text{ном}}$ определяют по формулам:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для двигателя} \quad S'_{\text{ном}} = k_E P_{\text{ном}} / (\eta \cos \varphi); \\ \text{для генератора} \quad S'_{\text{ном}} = k_E P_{\text{ном}} / \cos \varphi. \end{array} \right\} \quad (9.1)$$

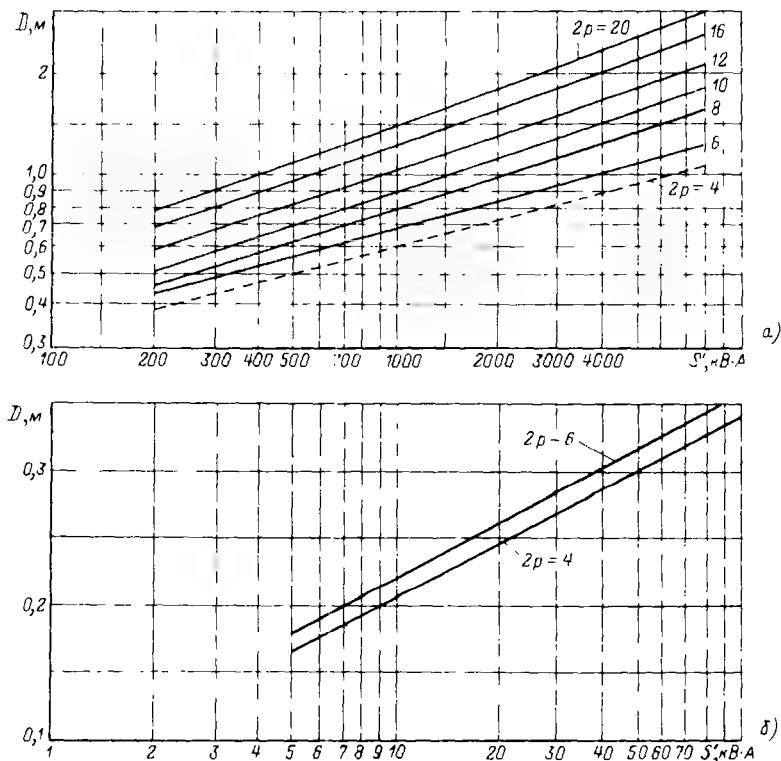


Рис. 9.8. Зависимость $D = f(S')$ при различных числах полюсов:
 а - при $S' > 100$ кВ · А; б - при $S' \leq 100$ кВ · А

Коэффициент k_E представляет собой отношение ЭДС в якоре при номинальной нагрузке к номинальному напряжению. Он зависит от $\cos \varphi$ и сопротивления обмотки статора. При работе синхронного двигателя с опережающим током и $\cos \varphi \approx 0,9$ можно принять $k_E \approx 1,05 \div 1,06$; для генераторов, работающих с отстающим током и $\cos \varphi = 0,8$, принимают $k_E \approx 1,08$.

Коэффициент полезного действия η для двигателей предварительно можно взять из табл. 9.3, где даны значения КПД для серийно выпускаемых синхронных двигателей при номинальном напряжении $U_{\text{ном}} = 6000$ В. При $U_{\text{ном}} = 380$ В КПД двигателей увеличивается на 0,3–1%, а при $U_{\text{ном}} = 10000$ В снижается на 0,05–0,2%. Коэффициенты полезного действия выпускаемых в настоящее время синхронных генераторов при $\cos \varphi = 0,8$ и $U_{\text{ном}} = 400$ В даны в табл. 9.4.

Таблица 9.3. Значения КПД синхронных двигателей, %, при $\cos \varphi = 0,9$ и $U_{\text{ном}} = 6000$ В

$P_{\text{ном}},$ кВт	$n_{\text{ном}},$ об/мин							
	1500	1000	750	600	500	375	300	250
315	—	94,2	93,9	93,4	—	91,25	91,27	90,8
400	—	94,6	94	93,9	92,9	91,6	91,94	92
500	—	94,7	94,4	94,3	93,7	92,65	93	93
630	95	95,1	94,9	94,6	94,28	93,4	93,34	93,5
800	95,5	95,6	94,95	95,17	94,42	94,2	93,9	93,9
1000	95,5	95,63	95,5	95,5	95	95	94,4	94,45
1250	—	95,9	95,8	95,54	95,45	95,3	94,66	94,66
1600	—	96,3	96	96	95,85	95,77	95,2	95
2000	—	96,8	96,3	96,3	96,2	95,78	95,7	95,4
2500	—	96,8	96,7	96,6	96,5	96,23	95,72	95,65
3200	—	97	96,8	96,88	96,6	96,69	96,1	96
4000	—	97,2	97	96,83	96,76	96,54	96,3	96,28
5000	—	97,3	97,2	97,09	97,07	—	—	—

Таблица 9.4. Значения КПД синхронных генераторов, %, при $\cos \varphi = 0,8$ и $U_{\text{ном}} = 400$ В

$P_{\text{ном}},$ кВт	$n_{\text{ном}},$ об/мин			
	1000	600	500	375
125	—	—	90,5	—
160	—	91,3	—	—
200	—	—	91,9	—
250	93	92,6	—	—
315	—	—	92,7	—
400	—	—	—	92,6
500	—	—	—	93,4
630	—	—	—	93,8
800	—	—	—	94,1

При других значениях мощности, частоты вращения и напряжения предварительное значение КПД генераторов при $\cos \varphi = 0,8$ можно получить по табл. 9.3 (с учетом поправки по напряжению), снизив найденное значение на 0,2–0,7%. В табл. 9.5 даны КПД для генераторов мощностью до 100 кВт.

По найденному диаметру определяют полюсное деление:

$$\tau = \pi D / (2p), \quad (9.2)$$

где $p = 60f / n_{\text{ном}}$.

Таблица 9.5. Значения КПД синхронных генераторов, %, при $\cos \varphi = 0,8$, $U_{\text{ном}} = 230$ и 400 В и $n_{\text{ном}} = 1500$ об/мин

$P_{\text{ном}}$, кВт	4	8	12	16	20	30	50	60	75	100
η , %	80	82,2	86	87	87,5	88	90	90,5	91	92,5

Таблица 9.6

$2p$	4	6	8	10	12	16
K_D	1,43–1,52	1,4–1,45	1,35–1,4	1,3–1,35	1,28–1,33	1,22–1,28

Предварительное значение внешнего диаметра статора D_a находят по формуле

$$D_a = K_D D. \quad (9.3)$$

Коэффициент K_D в зависимости от числа полюсов машины имеет значения, приведенные в табл. 9.6.

Полученное значение D_a следует округлить до ближайшего нормализованного диаметра. Значения их даны в табл. 9.7. Нормализованные диаметры получены исходя из наиболее благоприятного раскроя листов электротехнической стали, при котором уменьшаются отходы при штамповке. Нормализованным диаметром определяется габарит машины.

От выбранного внешнего диаметра магнитопровода статора D_a зависит высота оси вращения h у проектируемой машины. Высоты осей вращения в зависимости от D_a для выпускаемых в настоящее время синхронных машин даны в табл. 9.7. Машины, выполненные на диамет-

Таблица 9.7

Габарит	Диаметр, мм	Высота оси вращения, мм	Габарит	Диаметр, мм	Высота оси вращения, мм
5	280	180	14	850	500
6	327	200	15	990	560
7	393	225	16	1180	630
8	423	250	17	1430	630
9	493	280	18	1730	630
10	520	315	19	2150	630
11	590	355	20	2600	630
12	660	400	21	3250	630
13	740	450			

рах D_a от 1180 мм и выше, имеют высоту оси вращения $h = 630$ мм, что достигается соответствующей приваркой лап к станине (см. рис. 9.3).

Если в результате округления отношение D_a/D будет выходить за пределы значений коэффициента K_D , то следует произвести перерасчет внутреннего диаметра D и полюсного деления τ :

$$D = D_a / K_D; \quad \tau = \pi D / (2p). \quad (9.4)$$

В этом случае для K_D можно взять среднее значение при данном числе полюсов.

По полученному диаметру D находят расчетную длину машины, м:

$$l_\delta = \frac{6,1 S'_{\text{ном}}}{\alpha_\delta k_B k_{\text{об1}} A B_{\delta_{\text{ном}}} D^2 n_{\text{ном}}}, \quad (9.5)$$

где α_δ – расчетный коэффициент полюсного перекрытия (см. рис. 9.21); k_B – коэффициент формы поля (см. рис. 9.21); $k_{\text{об1}}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора; D – внутренний диаметр статора, м; A – линейная нагрузка статора, А/м; $B_{\delta_{\text{ном}}}$ – максимальное значение индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке, Тл.

Как α_δ , так и k_B зависят от размеров и конфигурации полюсного наконечника, а также воздушного зазора и полюсного деления. Поскольку на данной стадии расчета эти значения неизвестны, то предварительно можно принять $\alpha_\delta = 0,65 \div 0,68$, $k_B = 1,16 \div 1,41$, а их произведение $\alpha_\delta k_B = 0,75 \div 0,78$ (эти значения соответствуют $\alpha = 0,68 \div 0,72$, $\delta_m/\delta = 1,5$ и $\delta/\tau = 0,01$). При равномерном воздушном зазоре над полюсным наконечником в машинах небольшой мощности (менее 100 кВт) $\delta_m/\delta = 1$, и можно принять $\alpha_\delta k_B = 0,84 \div 0,87$.

Обмоточный коэффициент $k_{\text{об1}}$ определяют по шагу обмотки статора и числу пазов на полюс и фазу. Предварительно $k_{\text{об1}}$ можно взять равным 0,92, что примерно соответствует шагу обмотки $y = 0,83$.

Линейную нагрузку A и индукцию $B_{\delta_{\text{ном}}}$ для машин мощностью от 100–150 кВт и выше выбирают по кривым рис. 9.9, где приведенные зависимости получены для серийно выпускаемых синхронных машин с номинальным напряжением 6000–6600 В. Эти же зависимости соответствуют машинам и при номинальном напряжении 380–400 В. При номинальном напряжении 10000 В индукцию $B_{\delta_{\text{ном}}}$ можно также выбирать по кривым рис. 9.9, а линейную нагрузку целесообразно снизить на 10–15%, так как из-за более толстой пазовой изоляции ухудшается охлаждение проводников обмотки якоря.

Значения индукции $B_{\delta_{\text{ном}}}$ и линейной нагрузки A для машин мощностью менее 100 кВт выбирают по рис. 9.10.

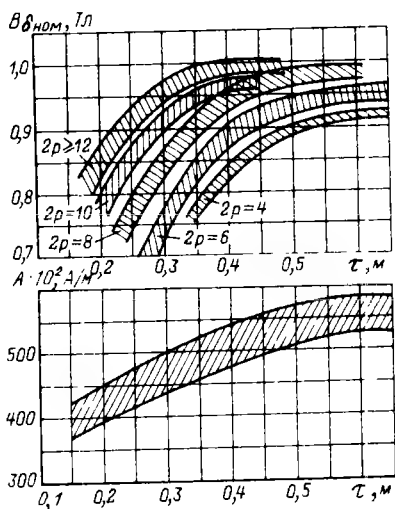


Рис. 9.9. Зависимость $B_{\delta\text{ном}}$ и A от τ для синхронных машин мощностью больше 100 кВт

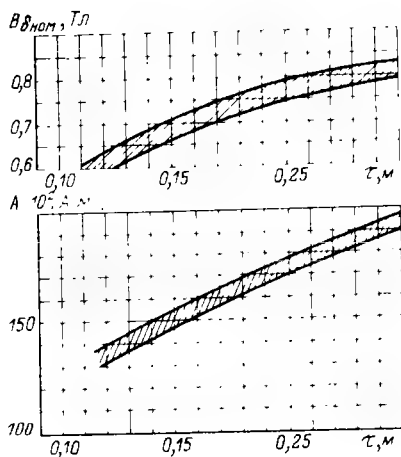


Рис. 9.10. Зависимость $B_{\delta\text{ном}}$ и A от τ для синхронных машин мощностью менее 100 кВт

Найденные из рис. 9.9 или 9.10 значения A и $B_{\delta\text{ном}}$ следует рассматривать как предварительные. В дальнейшем расчете при необходимости их можно изменить. При этом следует иметь в виду, что в зависимости от выбора A и $B_{\delta\text{ном}}$ изменяется активный объем $D^2 l_{\delta}$ проектируемой машины. Чем больше произведение $AB_{\delta\text{ном}}$, тем меньше объем будет иметь машина. Однако как A , так и $B_{\delta\text{ном}}$ имеют свои верхние пределы.

Основным фактором, ограничивающим линейную нагрузку, является нагрев обмотки, так как с возрастанием A в ней увеличиваются электрические потери. Допустимое значение линейной нагрузки зависит от класса нагревостойкости применяемой изоляции, а также от конструктивного выполнения машины и, прежде всего, от способов ее охлаждения. Приведенные на рис. 9.9 и 9.10 значения A получены по данным выпускаемых в настоящее время синхронных машин защищенного исполнения с косвенным воздушным охлаждением, имеющих изоляцию класса нагревостойкости В. При применении изоляции класса нагревостойкости F линейную нагрузку следует увеличить в 1,12 раза, а при применении изоляции класса нагревостойкости H — в 1,2 раза.

Верхний предел индукции $B_{\delta\text{ном}}$ ограничен, главным образом, насыщением магнитной цепи и в первую очередь насыщением зубцового

слоя. С повышением насыщения увеличивается мощность, необходимая для возбуждения машины, вследствие чего возрастают размеры обмотки возбуждения и высота полюса.

Следует также отметить, что от отношения $A/B_{\delta_{ном}}$ зависят индуктивные сопротивления обмотки. С увеличением этого отношения индуктивные сопротивления возрастают.

Определив расчетную длину машины l_{δ} , находим отношение

$$\lambda = l_{\delta} / \tau. \quad (9.6)$$

От λ зависят ряд показателей машины и условия ее охлаждения. Чем длиннее машина (больше λ), тем хуже условия ее охлаждения. Значение λ для выпускаемых в настоящее время синхронных машин обычно лежит в пределах, указанных на рис. 9.11. Если λ не укладывается в указанные пределы, то следует изменить диаметр D , а если потребуется, то и внешний диаметр D_a . При изменении диаметра D в соответствии с (9.5) изменится и l_{δ} .

У машин небольшой мощности при l_{δ} меньше 250–300 мм, а у более крупных машин меньше 200 мм магнитопровод статора выполняется из одного пакета.

При большей длине в целях улучшения охлаждения сталь статора разбивают на несколько пакетов, между которыми выполняют радиальные вентиляционные каналы (рис. 9.12). Обычно длину пакетов $l_{\text{пак}}$ выбирают равной 4–5 см, а ширину канала $b_k = 1$ см. При наличии вентиляционных каналов истинная длина статора будет больше расчетной и может быть найдена по формуле

$$l_1 \approx (1,05 \div 1,08) l_{\delta}. \quad (9.7)$$

Длину всех пакетов чаще всего принимают одинаковой. Число вентиляционных каналов в этом случае будет равно:

$$n_k = (l_1 - l_{\text{пак}}) / (l_{\text{пак}} + b_k), \quad (9.8)$$

причем n_k округляют до целого числа.

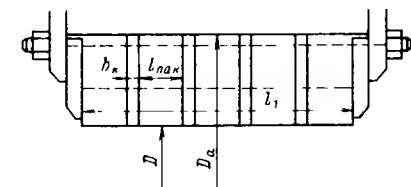
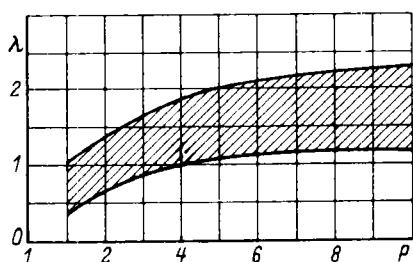


Рис. 9.12. Размеры активной стали статора

Рис. 9.11. Значения $\lambda = l_{\delta} / \tau$ в зависимости от числа пар полюсов

Определив число каналов, уточняют длину пакета:

$$l_{\text{пак}} = (l_1 - n_k b_k) / (n_k + 1). \quad (9.9)$$

Суммарная длина пакетов сердечника

$$l_{\text{ст1}} = l_{\text{пак}} (n_k + 1). \quad (9.10)$$

В некоторых случаях, главным образом для машин, имеющих большую длину, крайние пакеты изготовляют более длинными, чем средние.

9.6. ОБМОТКА И ЗУБЦОВАЯ ЗОНА СТАТОРА

Для статоров синхронных машин находят применение петлевые обмотки, состоящие из многовитковых катушек, и волновые обмотки с числом эффективных проводников в пазу не более двух. Применение волновых обмоток имеет определенные преимущества при токах в параллельной ветви более 1000 А, поэтому они целесообразны для очень крупных машин (гидрогенераторы, турбогенераторы).

Для статоров синхронных машин общего назначения находят применение двухслойные катушечные петлевые обмотки с числом эффективных проводников в пазу $u_{\text{д}}$ более двух (см. гл. 3). По условиям технологии каждый эффективный проводник в зависимости от его сечения составляется из нескольких элементарных прямоугольных проводников с поперечным сечением 12–20 мм². Ток в таком составном проводнике допускается до 150–200 А. Если номинальный фазный ток машины $I_{\text{ном.ф}}$ превышает указанные пределы, то обмотку выполняют из нескольких параллельных ветвей.

Номинальный фазный ток $I_{\text{ном.ф}}$ обмотки статора при соединении ее в звезду равен линейному току $I_{\text{ном}}$, а при соединении в треугольник будет в $\sqrt{3}$ раз меньше: $I_{\text{ном.ф}} = I_{\text{ном}} / \sqrt{3}$.

Номинальный линейный ток $I_{\text{ном}}$ машины определяют исходя из заданных номинальных значений мощности и напряжения:

для генератора

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{ном}} &= \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi}; \\ \text{для двигателя} \\ I_{\text{ном}} &= \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \eta \cos \varphi}. \end{aligned} \right\} \quad (9.11)$$

При выборе числа параллельных ветвей следует исходить из того, чтобы ток в параллельной ветви находился в пределах от 50 до 150 А

или в крайнем случае до 200 А:

$$a = I_{\text{ном.ф}} / [50 \div 150 (200)]. \quad (9.12)$$

В этом диапазоне намечают возможное число параллельных ветвей (a — целое число), имея в виду, что a должно быть кратно числу полюсов. В дальнейшем число параллельных ветвей необходимо увязать с выбранным числом пазов.

При выборе числа пазов следует учитывать ряд обстоятельств, влияющих на технико-экономические показатели проектируемой машины. При большом числе пазов увеличивается расход дорогостоящей пазовой изоляции, уменьшается механическая прочность зубцов, но улучшается форма кривых ЭДС и МДС обмотки статора.

При уменьшении числа пазов возрастают объем тока в пазу и перепад температуры в изоляции, увеличиваются добавочные потери в меди, а также пульсационные и поверхностные потери. Кроме того, с увеличением размеров катушки усложняются ее изготовление и укладка в пазы. При разработке серии в целях унификации обмоточных проводов и числа применяемых штампов стремятся выбирать одинаковые пазы для машин с различным числом полюсов.

Оптимальный выбор числа пазов Z_1 может быть сделан путем расчета и сопоставления между собой ряда вариантов. Задача упрощается, если воспользоваться опытом разработки подобных машин, при этом можно исходить из зубцового деления:

$$t_{Z1} = \pi D / Z_1. \quad (9.13)$$

На рис. 9.13 показаны пределы изменения t_{Z1} в зависимости от полюсного деления τ для выпускаемых в настоящее время машин общего назначения мощностью свыше 100 кВт. Определив при данном значении τ максимальное и минимальное значения t_{Z1} , находят числа пазов (зубцов) машины:

$$Z_{1\max} = \pi D / t_{Z1\min};$$

$$Z_{1\min} = \pi D / t_{Z1\max}. \quad (9.14)$$

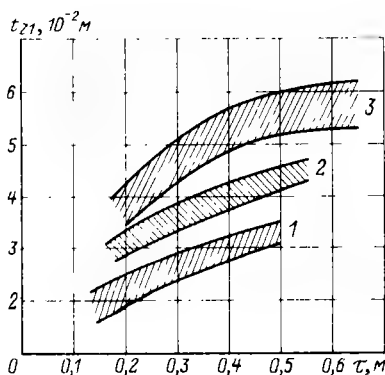


Рис. 9.13. Пределы изменения зубцового деления t_{Z1} в зависимости от полюсного деления τ для синхронных машин:

1—13-го и 14-го габаритов; 2—16-го и 17-го габаритов; 3—18—21-го габаритов

Из этого диапазона выбирают такие числа пазов (Z_1 — целое число), при которых выполняются следующие требования.

1. Z_1 должно быть кратным числу фаз m и числу параллельных ветвей a , т. е. Z_1/ma — целое число.

2. Число пазов на полюс и фазу $q_1 = Z_1/2pm$ должно быть целым или дробным вида $q_1 = b + c/d$ (b — целое число, а c/d — правильная несократимая дробь), причем d не может быть кратно числу фаз m и должно быть меньше числа пар полюсов.

Для синхронных машин общего назначения при $2p < 8$ чаще всего выбирают целое число пазов на полюс и фазу [$q_1 = 3(2 \div 5)$] (большие значения для машин с меньшим числом полюсов). При числе полюсов $2p > 8$ и малом полюсном делении можно выбирать обмотки с дробным q_1 ($1\frac{1}{2} < q_1 < 3$).

3. Число параллельных ветвей и число полюсов должны быть связаны следующими соотношениями:

а) при целом числе пазов на полюс и фазу $2p/a$ — целое число;

б) при дробном числе пазов на полюс и фазу $2p/ad$ — целое число;

4. Для удобства сегментировки статора желательно, чтобы число пазов разлагалось на возможно большее число простых множителей (2, 3, 5).

5. Число пазов должно быть кратным числу разъемов статора.

Четвертое требование следует выполнять для машин, имеющих внешний диаметр статора $D_a > 990$ мм, а пятое — для машин с $D_a > 3250$ мм. Из найденного выше диапазона чисел пазов выбирают такие Z_1 , при которых наиболее полно удовлетворяются указанные требования. Затем определяют число эффективных проводников в пазу u_n и зубцовое деление t_{Z1} :

$$u_n = \frac{\pi a D A}{Z_1 I_{\text{ном.ф}}}, \quad (9.15)$$

значение u_n округляют до ближайшего четного числа.

По найденному значению u_n уточняют линейную нагрузку:

$$A = \frac{Z_1 u_n I_{\text{ном.ф}}}{\pi a D}. \quad (9.16)$$

Наилучшим вариантом числа пазов следует признать такой, при котором уточненное значение линейной нагрузки незначительно отличается от выбранной в начале расчета ($\pm 5\%$) и зубцовое деление имеет приемлемое значение. Полученные таким образом значения Z_1 , u_n , a , q и A для машин с $D_a < 990$ мм являются окончательными и должны использоваться в дальнейших расчетах.

Для машин, имеющих $D_a > 990$ мм, число пазов устанавливают после выбора сегментировки статора (см. § 9.7).

У синхронных машин мощностью менее 100 кВт при $U_{\text{ном}} < 500$ В для статора чаще всего применяют полузакрытые пазы и насыпные петлевые обмотки из круглых проводников. Пазы имеют трапецевидальную или грушевидную форму. Число пазов на полюс и фазу q_1 принимают целым и выбирают в пределах от 2 до 5. Большее значение q_1 принимают для машин с меньшим числом полюсов.

Задавшись числом q_1 , определим общее число зубцов статора:

$$Z_1 = 2pq_1m. \quad (9.17)$$

Тогда зубцовое деление статора

$$t_{Z1} = \pi D / Z_1. \quad (9.18)$$

Зубцовое деление для этих машин составляет 1,5–2,5 см. Число эффективных проводников в пазу статора

$$u_n = t_{Z1} Aa / I_{\text{ном.ф.}} \quad (9.19)$$

При двухслойной обмотке статора u_n должно быть четным. При округлении u_n следует контролировать изменение линейной нагрузки A . При значительном ее отклонении от ранее выбранной (более $\pm 5\%$) может потребоваться изменение t_{Z1} . При этом выбирают другое значение q_1 или число параллельных ветвей.

9.7. СЕГМЕНТИРОВКА СТАТОРА

Листы электротехнической стали выпускаются с максимальной шириной 1000 мм. Поэтому когда $D_a > 990$ мм, то магнитопровод статора собирается из отдельных сегментов (рис. 9.14).

Хорда H сегмента (рис. 9.15) с необходимым припуском на штамповку (5–10 мм) должна быть возможно ближе к ширине одного из стандартных листов электротехнической стали, имеющих размеры 600 × 1500, 750 × 1500, 860 × 1720, 1000 × 2000 мм.

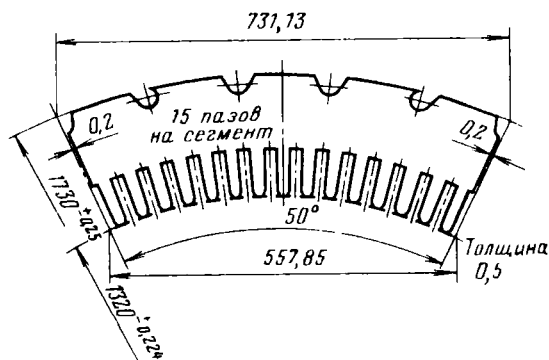
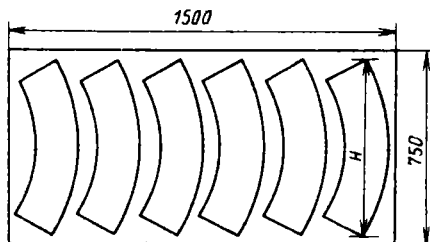


Рис. 9.14. Сегмент стали статора

Рис. 9.15. Раскрой стандартного листа электротехнической стали



Если принять, что число сегментов в полной окружности статора равно $s_{ст}$, то можно определить длину хорды H :

$$H = D_a \sin(180^\circ / s_{ст}). \quad (9.20)$$

Хорда также может быть выбрана равной примерно половине ширины листа, но не менее 370 мм. Число сегментов в слое может быть целым или дробным. Предпочтительным является целое число сегментов. Для большинства выпускаемых в настоящее время средних и крупных синхронных машин общего назначения число сегментов равно целому числу и выбрано в пределах от 6 до 18. Однако встречаются отдельные машины, у которых $s_{ст}$ равно целому числу плюс $1/5$, или $2/5$, или $1/2$, или $1/3$. На рис. 9.14 показан сегмент с 15 пазми: его дуга соответствует 50° . Следовательно, здесь $s_{ст} = 7 \frac{1}{5}$ и в одном слое будут укладываться семь сегментов, а $4/5$ восьмого перейдет в следующий слой и т. д. Каждый сегмент должен иметь целое число пазовых делений, а стыки между соседними сегментами должны проходить через середину паза. Для того чтобы избежать накладывания краев сегментов друг на друга, между сегментами одного слоя предусматривается промежуток в 0,4–0,6 мм. Число пазов в сегменте берется от 8 до 20. При четном числе пазовых делений в сегменте каждый следующий их слой сдвигается на $1/2$ сегмента, а при нечетном числе – на $1/3$ сегмента, для чего число пазовых делений должно быть кратно трем. Если число сегментов в слое дробное, то число пазов в сегменте должно быть кратным знаменателю дроби.

Сегменты сердечника статора крепят к корпусу на двух, трех, а иногда и большем числе клиньев или шпилек. Для этого на внешней дуге сегмента предусматривают пазы соответствующей формы, расположенные обычно симметрично относительно середины сегмента. При круглых пазах крайние отверстия делают скошенными (см. рис. 9.14). Как правило, синхронные машины общего назначения имеют внешний диаметр меньше 3250 мм. Поэтому подразделение статора на части, вызванное возможностью его транспортировки по железной дороге, у них не производится.

При проектировании статора стремятся к подбору такого числа пазов статора Z_1 , при котором на один сегмент приходилось бы соответ-

ствующее целое их число, а сегменты обеспечивали бы хороший раскрой листов стали. Задача эта может решаться двояко.

1. При данном Z_1 находят возможные варианты чисел сегментов и их хорд. Число сегментов должно быть кратно числу пазов, и для их определения целесообразно использовать разложение Z_1 на множители.

2. Задаются рядом размеров хорды H и приближенно находят число сегментов:

$$s_{\text{ст}} = \pi D/H.$$

Хорда H должна быть равна или несколько меньше следующих значений: 370, 420, 490, 590, 740, 850 мм. Затем, округляя $s_{\text{ст}}$ до целого или соответствующего дробного числа, добиваются, чтобы число зубцов Z_s в сегменте было равно целому числу $Z_s = Z_1/s_{\text{ст}}$, после чего уточняют длину хорды H по (9.20). Такие расчеты целесообразно проделать для нескольких выбранных ранее значений Z_1 . Для удобства сопоставления результаты расчетов следует свести в табл. 9.8.

В результате расчета определяют варианты, удовлетворяющие изложенным требованиям к сегментировке, из числа которых выбирают наиболее оптимальный.

Таблица 9.8

Номер вари- анта	Чис- ло па- зов Z_1	Чис- ло сег- ментов $s_{\text{ст}}$	Хорда сегмен- та H	Число пазов в сег- менте Z_s	Число пазов на по- люс и фа- зу q_1	Число парал- лель- ных ветвей a	Число эффек- тивных провод- ников в пазу $u_{\text{п}}$	Зубцо- вое (пазо- вое) деле- ние t_{Z_1}	Линей- ная на- грузка A
1									
2									

Если ни при одном значении Z_1 удовлетворительной сегментировки не получается, то следует выбрать новые значения Z_1 за счет небольшого изменения пределов зубцового деления t_{Z_1} или за счет изменения диаметров и длины статора, а затем повторить расчет.

Число пазов Z_1 , пазов на полюс и фазу q_1 , параллельных ветвей a , эффективных проводников в пазу $u_{\text{п}}$, соответствующих окончательно выбранному варианту, можно принять для дальнейших расчетов.

9.8. ПАЗЫ, ОБМОТКА И ЯРМО СТАТОРА

а) Размеры пазов статора.

После того как окончательно установлены число пазов статора и зубцовое деление t_{Z1} , приступают к определению размеров паза и проводников обмотки.

Опыт проектирования и теоретический анализ показывают, что с точки зрения наилучшего использования машины существует optimum ширины отношения паза $b_{п1}$ к зубцовому делению t_{Z1} . При прямоугольных пазах, которые применяют для машин мощностью выше 100 кВт, оптимальное отношение $b_{п1}/t_{Z1}$ в среднем составляет 0,42, причем небольшие отклонения существенно не отражаются на показателях машины. Исходя из этого, можно предварительно определить ширину паза по соотношению

$$b_{п1} \approx (0,34 \div 0,50)t_{Z1}. \quad (9.21)$$

Большие значения относятся к машинам меньших габаритов. Ширину паза берут тем больше, чем выше напряжение машины и чем толще изоляция. При узких пазах снижается коэффициент заполнения паза медью. С увеличением ширины паза увеличиваются добавочные потери на поверхности полюсных наконечников. Обычно ширина паза лежит в пределах 10–20 мм. Окончательно ширину паза устанавливают после выбора проводников обмотки.

Сечение эффективного проводника обмотки статора

$$q_{эф} = I_{ном.ф} / (aJ_1). \quad (9.22)$$

Допустимая плотность тока J_1 определяется по произведению AJ_1 , которое является характеристикой тепловой нагрузки обмотки и зависит от класса нагревостойкости применяемой изоляции. На рис. 9.16 дана зависимость $AJ_1 = f(\tau)$ для серийных синхронных машин с изоляцией класса нагревостойкости В. При применении изоляции класса нагревостойкости F значения AJ_1 , приведенные на рис. 9.16, можно увеличить на 20–25 %, а при изоляции класса H – на 40–45 %.

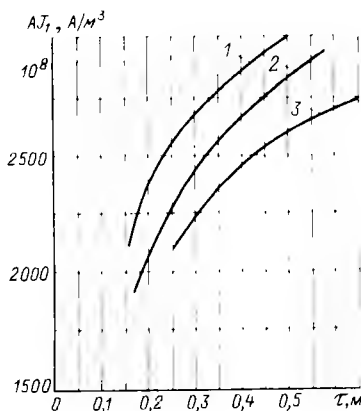


Рис. 9.16. Зависимость AJ_1 от τ для синхронных машин:

1 – 13-го и 14-го габаритов; 2 – 16-го и 17-го габаритов; 3 – 18–21-го габаритов

Плотность тока

$$J_1 = (AJ_1)/A. \quad (9.23)$$

При определении размеров проводника можно исходить из следующих рекомендаций.

В целях уменьшения потерь от вихревых токов проводники в паз укладываются плашмя. Размеры проводника по высоте паза – толщину проводника a_1 – не следует брать больше 3–3,5 мм. Поперечное сечение проводника по возможности не должно превышать 18–20 мм². Если найденное сечение $q_{зф}$ больше 18–20 мм², то целесообразно его разбить на несколько элементарных $n_{эл}$ проводников:

$$n_{эл} \geq q_{зф}/(18 \div 20).$$

Число элементарных проводников в одном эффективном в общем случае

$$n_{эл} = n_{ш} n_{в}, \quad (9.24)$$

где $n_{ш}$ – число элементарных проводников по ширине паза (обычно один или два); $n_{в}$ – число проводников, располагаемых по высоте паза (от 1 до 4).

Возможная ширина изолированных проводников

$$b'_{1из} = b_{п1} - \delta_{из.п}. \quad (9.25)$$

Двусторонняя толщина изоляции паза по его ширине $\delta_{из.п}$ зависит от конструкции изоляции и номинального напряжения машины. Примеры выполнения изоляции обмоток статора даны в гл. 3.

В синхронных машинах от 100 кВт и выше, выпускаемых промышленностью в настоящее время, применяется терморезистивная или непрерывная изоляция класса нагревостойкости В, спецификация которой дана в табл. 3.5. Двусторонняя толщина этой изоляции составляет 6 мм при $U_{ном} = 10\,000$ В, 4,7 мм при $U_{ном} = 6000 \div 6600$ В и 2,2 мм при $U_{ном} = 380 \div 400$ В.

Предварительная ширина элементарного проводника с изоляцией

$$b_{1из} \approx \frac{b'_{1из}}{n_{ш}} \leq 7,5 \text{ мм}. \quad (9.26)$$

Ширина этого проводника без изоляции

$$b_1 = b_{1из} - \delta_{1из.пр},$$

где $\delta_{1из.пр}$ – двусторонняя толщина изоляции проводника. Двусторонняя толщина изоляции проводников различных марок дана в табл. ПЗ.4.

Для синхронных машин при номинальном напряжении от 3000 до 6000 В для обмотки якоря применяют провода с эмалеволокнистой изоляцией марки ПЭТВСД, не требующие наложения дополнительной витковой изоляции. Двусторонняя толщина изоляции таких проводов равна 0,5 мм.

При номинальном напряжении 10 000 В для обмотки якоря применяют провода ПСД. В качестве витковой изоляции накладывают вполнахлеста один слой стеклослюдинитовой ленты толщиной 0,09 мм. При напряжении менее 660 В применяют провода марок ПСД или ПЭТВП. По необходимому сечению элементарного проводника $q_{эл} = q_{эф}/n_{эл}$ и найденной предварительно его ширине b_1 по табл. ПЗ.3 выбирают ближайший стандартный проводник. Одновременно с шириной определяют и высоту проводника a_1 . Значения $q_{эл}$, b_1 и a_1 для выбранного стандартного проводника принимают за окончательные. По найденным значениям уточняют размеры изолированного элементарного проводника:

$$b_{1из} = b_1 + \delta_{1из.пр};$$

$$a_{1из} = a_1 + \delta_{1из.пр}.$$

После выбора проводников уточняют размеры паза:
ширина паза

$$b_{п1} = n_{ш}, \quad b_{1из} + \delta_{из.п} + \delta_{р.ш} + \delta_{ш}; \quad (9.27)$$

высота паза

$$h_{п1} = u_{пн} a_{1из} + \sum \delta_{из} + h_{к} + \delta_{р.в} + \delta_{в}, \quad (9.28)$$

где $h_{к}$ — высота клина: $h_{к} = 4 \div 5$ мм; $\sum \delta_{из}$ — суммарная толщина изоляции по высоте паза (определяется по табл. 3.5); $\delta_{р.ш}$, $\delta_{р.в}$ — допуски на разбухание изоляции: $\delta_{р.ш} = 0,05n_{ш}$; $\delta_{р.в} = 0,05n_{в}u_{пн}$; $\delta_{ш}$, $\delta_{в}$ — технологические допуски на укладку: $\delta_{ш} = \delta_{в} = 0,2$ мм.

Иногда в синхронных машинах применяется возбуждение полюсов от дополнительной обмотки, закладываемой в пазы статора. В зависимости от схемы возбуждения эта обмотка вместе с изоляцией занимает около 20% площади паза. При наличии такой обмотки высоту паза, найденную по (9.28), следует увеличить в 1,2–1,25 раза.

Размеры паза "в свету" округляют до десятых долей миллиметра.

Обычно $h_{п1}/b_{п1} = 4 \div 6,5$ для машин с $U_{ном} = 600 \div 6600$ В и 3,5–4,5 для машин с $U_{ном} = 380 \div 400$ В. Далее производят уточнение сечения эффективного проводника и плотности тока в нем. Сечение эффективного проводника $q_{эф}$ равно сумме сечений элементарных проводников:

$$q_{эф} = n_{эл} q_{эл}. \quad (9.29)$$

Фактическая плотность тока, A/m^2 ,

$$J_1 = I_{\text{ном.ф}} / (a q_{\text{зф}}). \quad (9.30)$$

Окончательно размеры паза устанавливают после вычерчивания масштабного эскиза паза, составления его подробной спецификации и проверки максимальной индукции в зубце, индукции в спинке статора, а также перепада температуры в изоляции.

Максимальная индукция в зубце, Тл,

$$B_{Z1\text{max}} = \frac{B_{\delta\text{ном}} t_{Z1} l_{\delta}}{(t_{Z1} - b_{\text{п1}}) l_{\text{ст1}} k_c}. \quad (9.31)$$

Индукция $B_{Z1\text{max}}$ обычно лежит в пределах 1,6–2 Тл. Индукция в спинке статора, Тл,

$$B_a = \frac{\alpha_{\delta} B_{\delta\text{ном}} \tau l_{\delta}}{2 h_a l_{\text{ст1}} k_c}, \quad (9.32)$$

где $h_a = (D_a - D)/2 - h_{\text{п1}}$ — высота спинки статора, м.

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия α_{δ} можно приближенно принять равным 0,65–0,68. Индукция B_a имеет значения 1,2–1,45 Тл.

Коэффициент заполнения пакета сталью k_c берется из табл. 2.1.

Статоры синхронных машин при частоте 50 Гц чаще всего выполняют из лакированных листов толщиной 0,5 мм ($k_c = 0,93$).

Перепад температуры в изоляции паза

$$\Delta\vartheta_{\text{из.п}} = \frac{J_1 A k_{\Phi}}{4,2 \cdot 10^{11}} \frac{t_{Z1}}{2(b_{\text{п1}} + h_{\text{п1}} - h_{\text{к}})} \frac{0,5\delta_{\text{из.п}}}{\lambda_{\text{из}}}, \quad (9.33)$$

где k_{Φ} — коэффициент добавочных потерь: $k_{\Phi} = 1,03 \div 1,1$; $\lambda_{\text{из}}$ — теплопроводность изоляции: $\lambda_{\text{из}} = 1 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м · °С) — для некомпандинированной изоляции; $\lambda_{\text{из}} = 1,6 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м · °С) — для компандинированной изоляции; $\lambda_{\text{из}} = 2,2 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м · °С) — для изоляции, выполненной по способу "монолит".

Для изоляции класса нагревостойкости В перепад температуры $\Delta\vartheta_{\text{из.п}}$ не должен превышать 30–35 °С.

В (9.31)–(9.33) линейные размеры подставляются в метрах, J — в A/m^2 , A — в A/m , B — в Тл.

Если индукция или $\Delta\vartheta_{\text{из.п}}$ превышают рекомендуемые пределы, то следует скорректировать размеры паза и проводов.

Как сказано выше, для машин низкого напряжения мощностью до 100 кВт (5–9-й габариты) в основном применяют полузакрытые пазы со всыпной обмоткой. Изоляция таких пазов дана в табл. 3.1.

В синхронных машинах, выпускаемых в настоящее время промышленностью, для обмоток статора применяют изоляцию класса "монолит". Обмотку выполняют из круглых проводников. Марку проводников выбирают в зависимости от принятой нагревостойкости изоляции. При нагревостойкости изоляции класса В рекомендуется применять провода марок ПЭТВ, ПЭТВМ или ПСД, а при классе нагревостойкости F — провода марок ПЭТ-155, ПЭТМ, ПСД, ПСДКТ. Возможно также применение проводников и других марок (см. гл. 2). При выполнении обмотки из круглых проводников не следует их диаметр выбирать более 2 мм, так как при большей толщине возникают трудности в укладке. При больших сечениях эффективного проводника его целесообразно разбить на несколько элементарных $n_{эл}$, а иногда выполнить обмотку в несколько a параллельных ветвей.

Сечение элементарного проводника, $м^2$,

$$q_{эл} = I_{ном.ф} / (n_{эл} a J_1). \quad (9.34)$$

Путем подбора $n_{эл}$ и a добиваются, чтобы $q_{эл} < 3,1 \cdot 10^{-6} м^2$ ($d_{эл} < 2 \cdot 10^3 м$). Плотность тока при изоляции класса нагревостойкости В выбирают в пределах $(6,9 - 7,5) \cdot 10^6 А/м^2$ для машин с $n_{ном} = 1500$ об/мин и $(5,9 - 6,5) \cdot 10^6 А/м^2$ для машин с $n_{ном} = 1000$ об/мин. Нижние пределы соответствуют более мощным машинам. При изоляции класса нагревостойкости F плотность тока в проводниках может быть повышена в 1,15 раза, а при изоляции класса нагревостойкости H — в 1,25 раза. По найденному сечению из табл. ПЗ.1 подбирают размеры стандартного провода, после чего определяют сечение эффективного проводника и уточняют плотность тока.

Необходимую площадь паза $S'_п$ для размещения изолированных проводников находят, задавшись коэффициентом заполнения k_3 :

$$S'_п = (u_п n_{эл} d_{эл.из}^2) / k_3, \quad (9.35)$$

где $d_{эл.из}$ — диаметр элементарного изолированного проводника; $S'_п$ — сечение паза без учета пазовой изоляции, площади клина и междукатушечной прокладки; k_3 — коэффициент заполнения: $k_3 = 0,68 \div 0,74$; меньшие значения рекомендуется выбирать для относительно длинных машин с большим числом проводников в пазу $u_п$.

При наличии дополнительной обмотки в пазах статора площадь $S'_п$ следует увеличить в 1,25 раза.

Размеры паза устанавливают после вычерчивания в масштабе одного зубцового деления (рис. 9.17). Сначала на чертеж наносят зубцы. Зубец, кроме верхней своей части, имеет одинаковую ширину b_z , которую можно определить, исходя из допустимого значения индукции B_{z1max} :

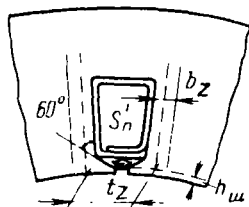


Рис. 9.17. К определению размеров полузакрытого паза при выппной обмотке

$$b_z = \frac{B_{\delta_{\text{ном}}} I_z l \delta}{B_{Z1\text{max}} l_{\text{ст1}} k_c} \quad (9.36)$$

Значения $B_{Z1\text{max}}$ выбирают в пределах 1,55–1,85 Тл; высота клина 2,5–3 мм.

Пространство, ограниченное зубцами и клином, за вычетом изоляции представляет часть паза, в котором размещаются проводники обмотки. Высоту этой части подбирают, исходя из того, чтобы площадь образовавшейся фигуры (на рис. 9.17 – трапеции) была равна S'_n . Для свободного проталкивания проводника при укладке обмотки ширину щели полузакрытых пазов выбирают на 1,5–2 мм больше диаметра изолированного проводника. Высота шлица $h_{\text{ш}} = 0,7 \div 1$ мм. После того как будут установлены размеры паза, следует по (9.32) проверить индукцию в спинке статора.

б) Обмотка статора

Эффективные витки в фазе обмотки статора

$$w_1 = 2pq_1 \frac{u_{\text{п}}}{2} \frac{1}{a} \quad (9.37)$$

Двухслойные обмотки статора, как правило, выполняют с укороченным шагом. Шаг обмотки обычно выбирают в пределах

$$y_1 = (0,8 \div 0,86) \tau_{\text{п}}, \quad (9.38)$$

где $\tau_{\text{п}} = 3q_1$; y_1 округляют до целого числа; $y/\tau_{\text{п}} = \beta < 1$.

Коэффициент укорочения

$$k_y = \sin(\pi\beta/2). \quad (9.39)$$

Коэффициент распределения

$$k_p = \frac{0,5}{q_1 \sin(30^\circ/q_1)} \quad (9.40)$$

При дробном числе пазов на полюс и фазу в (9.40) вместо q_1 подставляют $(bd + c)$.

Обмоточный коэффициент

$$k_{об} = k_y k_p. \quad (9.41)$$

9.9. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР И ПОЛЮСЫ РОТОРА

Воздушный зазор в основном определяет технико-экономические показатели машин. С одной стороны, при увеличении зазора возрастают размеры обмотки возбуждения и потери в этой обмотке. С другой стороны, при малых зазорах повышаются добавочные потери на поверхности полюсных наконечников, а также при деформации ротора появляется опасность задевания его о статор. От зазора зависят возможные кратковременные перегрузки синхронной машины по моменту и мощности. На максимальные значения момента M_{max} и электромагнитной мощности $P_{эм}$ существенное влияние оказывает синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси x_d . Чем больше зазор, тем меньше индуктивное сопротивление x_d и, следовательно, большими будут кратности максимальных значений момента $M_{max}/M_{ном}$ и мощности $P_{эм}/P_{ном}$. В синхронных машинах общего назначения при выборе воздушного зазора обычно исходят из значения x_d , при котором $M_{max}/M_{ном}$ или $P_{эм}/P_{ном}$ будут иметь необходимые значения. Связь между x_d и зазором δ устанавливается известным соотношением

$$x_{ad*} = \frac{k_{ad}}{k_{\mu 0}} \cdot \frac{F_{aном}}{F_{\delta 0}} = \frac{k_{ad} 0,45 m I_{ном.ф} \frac{w_1 k_{об1}}{p}}{k_{\mu 0} \frac{B_{\delta 0}}{\mu_0} \delta k_{\delta}}. \quad (9.42)$$

Учитывая, что $2m w_1 I_{ном.ф} / (2p\tau) = A$, после преобразований получаем

$$x_{ad*} = \frac{0,45 k_{ad} k_{об1} A \tau}{k_{\mu 0} \frac{B_{\delta 0}}{\mu_0} \delta k_{\delta}}, \quad (9.43)$$

где $x_{ad*} = x_{d*} - x_{\sigma*}$ — индуктивное сопротивление продольной реакции якоря; $x_{\sigma*}$, x_{d*} — индуктивные сопротивления рассеяния и синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси; k_{δ} — коэффициент воздушного зазора; k_{ad} — коэффициент продольной реакции якоря по рис. 9.23; $k_{\mu 0}$ — коэффициент, учитывающий влияние магнитных напряжений стальных участков магнитной цепи и стыков между

поллюсом и ярмом для ненасыщенной машины; $B_{\delta 0} \approx 0,95 B_{\delta \text{ном}}$ — максимальная индукция в зазоре при холостом ходе и номинальном напряжении, Тл; $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Г/м — магнитная постоянная.

Если принять в среднем $k_{об1} = 0,92$, $k_{ад} = 0,82$, $k_{\delta} = 1,3$, $x_{ад} = 0,92 x_d$ и $k_{\mu 0} = 1,07 \div 1,3$, то получим

$$\delta \approx (0,27 \div 0,33) \cdot 10^{-6} \frac{A}{B_{\delta 0}} \frac{\tau}{x_{d*}}. \quad (9.44)$$

В (9.44) подставляют A в А/м, B — в Тл, τ — в м, тогда δ получаем в метрах. Коэффициент в скобках выбирают тем меньше, чем большее значение имеет x_{d*} . Нижний его предел соответствует $x_{d*} \geq 1,9$. На рис. 9.18 дана зависимость $x_{d*} = f(M_{\text{max}}/M_{\text{ном}})$, полученная на основании усреднения расчетных данных явнополюсных синхронных машин общего назначения. По этой зависимости, исходя из заданного значения $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = P_{\text{эм}}/P_{\text{ном}}$, можно предварительно найти x_{d*} и подставить в (9.44). Для синхронных двигателей согласно ГОСТ 183-74 $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} \geq 1,65$. Такое же значение можно принимать для кратности максимальной мощности у генераторов. Обычно отношение $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$ лежит в пределах 1,65–2,5.

В современных синхронных машинах воздушный зазор по ширине полюсного наконечника делают неодинаковым. Чтобы получить распределение магнитного поля, приближающегося к синусоидальному, зазор под краями полюсов берут примерно в 1,5 раза большим, чем в середине, т. е. $\delta_m/\delta \approx 1,5$, где δ — зазор под серединой полюса. С этой целью радиус дуги полюсного наконечника выбирают меньше внутреннего радиуса статора (рис. 9.19):

$$R_p = \frac{D}{2 + 8D \frac{\delta_m - \delta}{b_p^2}}. \quad (9.45)$$

Среднее значение зазора принимают равным:

$$\delta' = \delta + \frac{1}{3} (\delta_m - \delta). \quad (9.46)$$

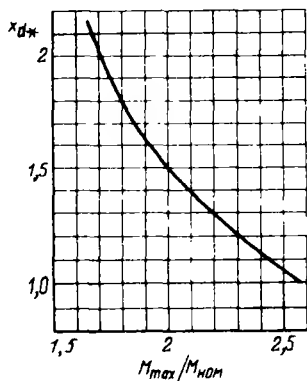


Рис. 9.18. Зависимость x_{d*} от $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$

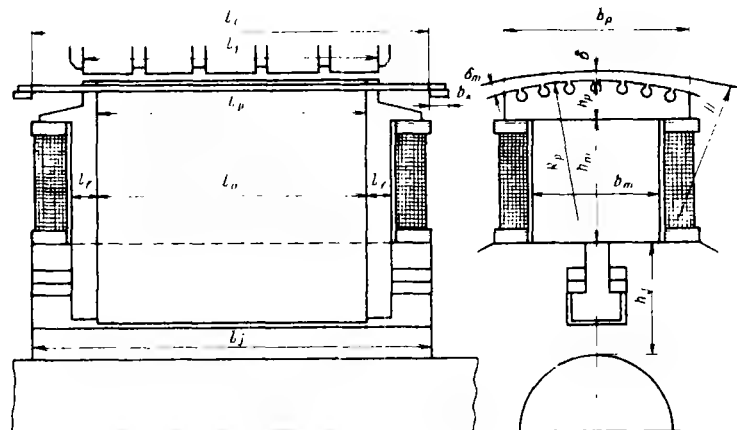


Рис. 9.19. Размеры ротора синхронной явнополюсной машины

Равномерный воздушный зазор по всей ширине полюсного наконечника в настоящее время применяют иногда в машинах небольшой мощности.

Длина полюсной дуги

$$b_p = a\tau, \quad (9.47)$$

где a — коэффициент полюсного перекрытия (конструктивный).

При $2p \geq 8$ хорда, соединяющая края полюсного наконечника, практически не отличается от дуги.

От a зависит использование активного объема машины. С увеличением a при прочих равных условиях уменьшается объем активной части машины, но возрастает поток рассеяния полюсов. Обычно a выбирают в пределах 0,68–0,73.

Полюсы чаще всего выполняют шихтованными. В крупных машинах для полюсов используют сталь Ст3 толщиной 1 или 1,4 мм. Запрессовку сердечников полюсов осуществляют с помощью нажимных щек и шпилек.

Полюсы в быстроходных машинах при $v_p \approx \pi Dn/60 > 30$ м/с прикрепляют с помощью хвостов к шихтованному остоу (см. рис. 9.3 и 9.19), а в тихоходных машинах приворачивают шпильками к ободу магнитного колеса (см. рис. 9.2). Шихтованный обод и магнитное колесо изготавливают из стали Ст3.

У машин мощностью меньше 100 кВт полюсы собирают из листов электротехнической стали и прикрепляют проходящими через них болтами к напрессованной на вал втулке или непосредственно к ва-

Таблица 9.9

τ , см	15–20	20–30	30–40	40–50	50–60	Примечание
h_p , см	2,2–3	3–4	4–5	5–6	6–7,5	При наличии демпферной клетки
h_p , см	1,6–2,2	2,2–3	3–3,7	3,7–4,5	4,5–5,5	При отсутствии демпферной клетки

лу. Применяют конструкцию ротора, показанную на рис. 9.7. Более подробно о креплении полюсов изложено в § 11.5.

Высоту полюсного наконечника h_p (рис. 9.19) выбирают, исходя из того, чтобы была возможность разместить на его краях стержни демпферной (пусковой) клетки, а также из условий достаточной механической прочности. В табл. 9.9 приводятся значения h_p в зависимости от полюсного деления машины.

Длины полюсного наконечника l_p и полюса l_m по оси машины принимают равными длине статора l_1 (или на 1–2 см меньше).

Высота полюсного сердечника h_m , м, предварительно может быть найдена по одной из следующих формул:

$$\left. \begin{aligned} h_m &\approx 0,016 + 0,186 \sqrt[4]{\tau} - \\ &\text{для машин 16–20-го габаритов;} \\ h_m &\approx 10,5\delta + 0,08 - \\ &\text{для машин 10–15-го габаритов при } 2p > 6; \\ h_m &\approx (0,45 \div 0,55) b_p - \\ &\text{для машин 10–15-го габаритов при } 2p \leq 6; \\ h_m &\approx (0,3 \div 0,35) D - (h_p + \delta) - \\ &\text{для машин небольшой мощности (до 100 кВт).} \end{aligned} \right\} \quad (9.48)$$

В (9.48) τ , δ , b_p , h_p и D подставляют в метрах.

Окончательно высоту h_m устанавливают после расчета обмотки возбуждения (см. § 9.15) и вычерчивания эскиза с расположением ее проводников в межполюсном пространстве.

Ширину полюсного сердечника b_m определяют, исходя из допустимого значения индукции B_m в основании полюса. При определении индукции B_m необходимо учитывать поток рассеяния полюса Φ_σ . Этот поток наряду с основным потоком Φ проходит по сердечнику полюса (см. § 9.11). Таким образом, поток полюса

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi(1 + \Phi_\sigma/\Phi) = \Phi\sigma_m, \quad (9.49)$$

где $\sigma_m = (1 + \Phi_\sigma/\Phi)$ — коэффициент рассеяния.

Поток и коэффициент рассеяния зависят от размеров полюса, которые пока неизвестны. Предварительно коэффициент рассеяния можно определить так:

$$\sigma_m \approx 1 + k \frac{0,35\delta}{r^2}, \quad (9.50)$$

где δ и r — в метрах; k — коэффициент, зависящий от высоты полюсного наконечника h_p .

При выборе коэффициента k можно руководствоваться следующими данными:

h_p , см	3	4	5	6	7
k	7	8,5	10	11	12

Тогда ширину полюсного сердечника находят по формуле

$$b_m = \frac{\alpha_\delta B_{\delta_{ном}} \tau l_\delta}{B_m k_{cp} l'_m} \sigma_m. \quad (9.51)$$

Коэффициент заполнения полюса сталью k_{cp} принимают равным при толщине листов 1 мм 0,95, при толщине листов 1,4 мм 0,97. Индукцию B_m выбирают в пределах 1,4–1,6 Тл.

Расчетная длина сердечника полюса, м,

$$l'_m = l_m + l_f, \quad (9.52)$$

где l_f — толщина одной нажимной щеки полюса, м:

$$l_f = (1,5 \div 3) \cdot 10^{-2}.$$

В (9.52) принимают l_f , а не $2l_f$, чтобы приближенно учесть ослабление сечения щек за счет закругления краев и отверстий для гаек стяжных шпилек.

Размеры остова и обода магнитного колеса l_j в большинстве случаев определяются конструктивными соображениями и требованиями механической прочности и получаются больше, чем это необходимо для проведения магнитного потока. Ввиду этого при электромагнитном расчете определяют длину остова или обода l_j и их минимально возможную толщину h_j . В дальнейшем при размещении обмотки возбуждения на полюсе и при разработке конструкции толщина остова или обода, а также их внешние диаметры и размеры самого полюса долж-

ны быть уточнены:

$$l_j = l_m + \Delta l_c, \quad (9.53)$$

для крупных машин $\Delta l_c = (10 \div 15) \cdot 10^{-2}$ м, для средних $\Delta l_c = (4 \div 5) \cdot 10^{-2}$ м и для малых $\Delta l_c = 0$;

$$h_j = \frac{\alpha_\delta B_{\delta_{ном}} \tau l_\delta}{2 B_j l_j} \sigma_m. \quad (9.54)$$

Индукция B_j выбирается в пределах 1–1,3 Тл.

9.10. РАСЧЕТ ДЕМПФЕРНОЙ (ПУСКОВОЙ) ОБМОТКИ

Демпферную (пусковую) обмотку размещают в пазах полюсных наконечников ротора (рис. 9.20, а). Эта обмотка в генераторах служит для ослабления обратного синхронного поля при несимметричной нагрузке, успокоения качаний ротора, предотвращения динамических перенапряжений при несимметричных коротких замыканиях и повышения электродинамической стойкости. В двигателях эта обмотка необходима для асинхронного пуска и успокоения качаний ротора.

Расчет демпферной обмотки заключается в определении количества и размеров стержней обмотки, а также размеров короткозамыкающих сегментов. Короткозамыкающие сегменты замыкают все стержни с торцов полюса и соединяются с сегментами соседних полюсов, образуя кольцо (рис. 9.20, б). В этом случае демпферная обмотка носит название продольно-поперечной. Если сегменты соседних полюсов не соединяются между собой (рис. 9.20, в), то обмотка называется продольной. Наиболее часто применяют продольно-поперечные демпферные обмотки.

Для машин общего назначения число стержней N_c на полюс выбирают обычно в пределах от 5 до 10. Стержни выполняют из меди или латуни круглого сечения. Чаще всего демпферную (пусковую) обмотку

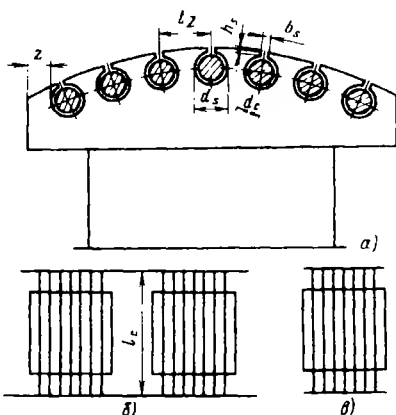


Рис. 9.20. Демпферная (пусковая) обмотка:

а — расположение обмотки на полюсе; б — продольно-поперечная обмотка; в — продольная обмотка

выполняют из медных стержней. Стержни из латуни применяют в тех случаях, когда необходимо получить большие значения начального пускового момента у синхронных двигателей. Иногда для повышения пускового момента обмотку изготавливают из разнородных материалов — крайние стержни клетки делают из латуни, а остальные — из меди. Поперечное сечение всех стержней, расположенных на полюсе, принимают равным 0,15–0,35 сечения меди обмотки статора, приходящейся на полюс. Исходя из этого сечение стержня

$$q_c = \frac{(0,15 \div 0,35) \tau A}{N_c J_1} \quad (9.55)$$

Коэффициент в скобках (9.55) для генераторов принимается равным 0,15–0,25, для двигателей 0,25–0,35.

Диаметр стержня

$$d_c = 1,13 \sqrt{q_c} \quad (9.56)$$

округляют до размера, кратного 0,5 мм.

Зубцовый шаг на роторе

$$t_{z2} = \frac{b_p - d_c - 2z}{N_c - 1}, \quad (9.57)$$

где z — расстояние между крайним стержнем и краем полюсного наконечника: $z \geq (0,3 \div 0,7) \cdot 10^{-2}$ м.

Кроме выполнения основной своей задачи демпферная обмотка снижает амплитуды гармоник магнитного поля, обусловленных зубчатостью статора. Эти гармоники вызывают пульсацию ЭДС в обмотке статора и образуют токи и добавочные потери в самой демпферной обмотке. Для того чтобы демпферная обмотка наилучшим образом выполняла свои задачи, при ее проектировании следует соблюдать следующие требования.

В генераторах для уменьшения добавочных потерь и искажения кривых ЭДС желательно иметь зубцовый шаг на роторе t_{z2} возможно более близким к зубцовому шагу статора t_{z1} . Если число пазов на полюс и фазу в статоре q_1 — целое число, или $q_1 = b + c/d = b + 1/2$, или $(bd + c) \leq 9$, то $0,8t_{z1} < t_{z2} < t_{z1}$.

Для исключения из кривой ЭДС высших гармонических, обусловленных зубчатостью статора, необходимо иметь

$$t_{z2} = \frac{k}{N_c - 1} \frac{6q_1}{6q_1 + 1} t_{z1}, \quad (9.58)$$

$$2\pi/t_{z2} - (6q_1 \pm 1) \geq 3, \quad (9.59)$$

где N_c — число стержней в полюсе; k — целое число, близкое к $(N_c - 1)$.

При достаточно высокой дробности зубцовые гармонические в кривой ЭДС не проявляются, поэтому при $(bd + c) > 9$ можно принимать $t_{z2} = t_{z1}$.

Исходя из этого необходимо найденное в (9.59) значение зубцового шага проверить на соответствие указанным требованиям и в случае их невыполнения сделать пересчет, задавшись другими значениями N_c или z .

В двигателях для уменьшения добавочных потерь и исключения "прилипания" ротора число стержней N_c и их шаг t_{z2} выбирают так, чтобы

$$\left. \begin{aligned} t_{z2} &\geq 0,8t_{z1}; \\ (N_c - 1)(1 - t_{z2}/t_{z1}) &> 0,75. \end{aligned} \right\} \quad (9.60)$$

Паза на роторе выбирают круглые, полузакрытые. Диаметр паза d_s , мм, равен $d_c = 0,1 \div 0,2$. Ширина шлица паза $b_s = 3 \div 4$ мм, высота $h_s = 2 \div 3$ мм. В дальнейшем при расчете параметров и пусковых характеристик раскрытие паза может быть уточнено.

Длина стержня l_c , м, предварительно может быть принята равной:

$$l_c = l_p + (0,2 \div 0,4)\tau. \quad (9.61)$$

Окончательно длину стержня устанавливают при разработке конструкции.

Сечение короткозамыкающего сегмента выбирают примерно равным половине полного сечения стержней одного полюса:

$$q_{к.з} = b_{к.з} h_{к.з} = (0,85 \div 1,15) 0,5 N_c q_c.$$

По найденному сечению выбирают стандартную полосовую медь (см. табл. П3.6) толщиной $b_{к.з}$ не менее $2/3 d_c$.

9.11. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи проводят в целях определения МДС обмотки возбуждения F_{f0} , необходимой для создания магнитного потока машины Φ при холостом ходе.

При вращении ротора этот поток наводит в обмотке статора ЭДС. Таким образом, в результате расчета магнитной цепи может быть построена зависимость $E = f(F_{f0})$, которая носит название характеристики холостого хода.

При расчете магнитной цепи задаются фазной ЭДС E в обмотке статора и по известному выражению определяют полезный поток, Вб:

$$\Phi = E / (4k_B f w_1 k_{об1}), \quad (9.62)$$

где w_1 и $k_{об1}$ — число витков и обмоточный коэффициент, фазы статора; f — частота, Гц; k_B — коэффициент формы поля, представляющий собой отношение действующего значения индукции к ее среднему значению.

При синусоидальном распределении магнитного потока в зазоре машины коэффициент формы поля $k_B = 1,11$. Однако в синхронных машинах магнитное поле имеет несинусоидальную форму. Характер распределения этого поля зависит от ширины и конфигурации полюсного наконечника, а также от относительной длины воздушного зазора δ/τ . Для определения коэффициента формы поля k_B в этом случае можно воспользоваться кривыми рис. 9.21, а, б.

По найденному потоку определяют максимальное значение индукции в воздушном зазоре машины, T_l :

$$B_\delta = \Phi / (\alpha_\delta \tau l_\delta), \quad (9.63)$$

где α_δ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия, равный отношению расчетной длины полюсной дуги b_δ к полюсному делению τ . Этот коэффициент определяют по рис. 9.21 в зависимости от α и δ/τ ; τ , l_δ — полюсное деление и расчетная длина, м.

Расчетную длину магнитопровода (уточненное значение) определяют по формуле

$$l_\delta = l_1 - b'_k n_k + 2\delta', \quad (9.64)$$

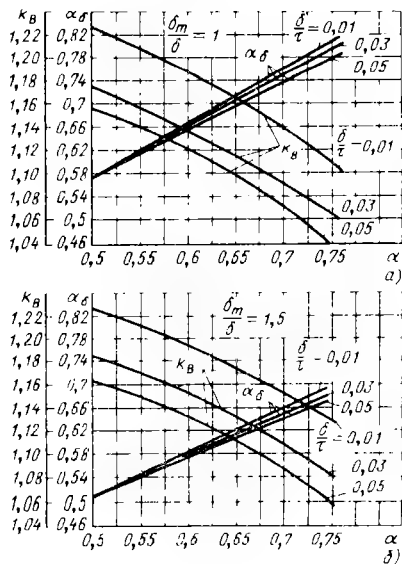
где

$$b'_k = \gamma \delta; \quad \gamma = (b_k / \delta)^2 / (5 + b_k / \delta).$$

Магнитодвужущую силу обмотки возбуждения определяют как сумму магнитных напряжений отдельных участков магнитной цепи машины.

Рис. 9.21. $\alpha_\delta = f(\alpha)$ и $k_B = f(\alpha)$ для синхронных машин:

а — при $\delta_m/\delta = 1$; б — при $\delta_m/\delta = 1,5$



1. Магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta} \delta k_{\delta}, \quad (9.65)$$

где B_{δ} – в Тл; δ – в м и $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

Коэффициент воздушного зазора k_{δ} учитывает зубчатое строение статора и ротора. Из-за наличия зубцов и пазов происходит перераспределение потока в зазоре, в результате чего индукция, а следовательно, и магнитное напряжение зазора над коронками зубцов возрастают. Этот коэффициент равен произведению коэффициентов воздушного зазора для статора $k_{\delta 1}$ и ротора $k_{\delta 2}$:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} k_{\delta 2}. \quad (9.66)$$

Коэффициент $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 2}$ определяют по эмпирическим формулам

$$\left. \begin{aligned} k_{\delta 1} &= \frac{t_{Z1} + 10\delta'}{t_{Z1} - b_{n1} + 10\delta'}; \\ k_{\delta 2} &= \frac{t_{Z2} + 10\delta'}{t_{Z2} - b_s + 10\delta'}, \end{aligned} \right\} \quad (9.67)$$

где t_{Z1} и t_{Z2} – зубцовые шаги статора и ротора; b_{n1} и b_s – ширина паза статора и прорези паза ротора; при полузакрытых пазах на статоре b_{n1} – ширина прорези паза.

2. Магнитное напряжение зубцов статора, А,

$$F_{Z1} = H_{Z1} h_{n1}. \quad (9.68)$$

Для упрощения расчета магнитного напряжения зубцов, имеющих трапецевидную форму, напряженность магнитного поля H_{Z1} находят по значению индукции B_{Z1} для одного сечения, расположенного от коронки на $1/3$ высоты паза h_{n1} :

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta} t_{Z1} l_{\delta}}{b_{Z1 \ 1/3} l_{ст1} k_c}. \quad (9.69)$$

Ширина зуба на высоте $1/3 h_{n1}$ от его коронки

$$b_{Z1 \ 1/3} = t_{Z1 \ 1/3} - b_{n1}, \quad (9.70)$$

где

$$t_{Z1\ 1/3} = \frac{\pi(D + 2h_{п1/3})}{Z_1}.$$

Высоту паза $h_{п1}$ и другие линейные размеры в формулы (9.68) и (9.70) подставляют в метрах, B_δ — в теслах и H_{Z1} — в амперах на метр.

Для машин небольшой мощности, имеющих полузакрытые пазы, зубец по большей части своей высоты имеет прямоугольную форму, и в этом случае B_{Z1} и H_{Z1} определяют для сечения, расположенного на $1/2$ высоты $h_{п1}$.

При нахождении H_{Z1} , соответствующего полученному значению индукции, используют кривые намагничивания стали, из которой выполнена магнитная система статора. У выпускаемых в настоящее время синхронных машин магнитопроводы статора выполняют из горячекатаных сталей марок 1211 для машин мощностью до 100 кВт и 1511, 1512, 1413 для более мощных машин.

При разработке новых машин возможно также применение изотропных холоднокатаных сталей, имеющих лучшие магнитные характеристики по сравнению с горячекатаными. Для машин относительно небольшой мощности целесообразно применение сталей марки 2013 или 2312, а для более мощных машин — марки 2411.

При значениях $B_{Z1} \leq 1,8$ Тл для горячекатаной стали и $B_{Z1} \leq 1,9$ Тл для холоднокатаной стали H_{Z1} для выбранной марки стали определяют по основным кривым намагничивания (см. приложение 1). При больших значениях индукции необходимо учитывать, что из-за насыщения зубцов часть потока будет ответвляться в пазы и вентиляционные каналы. Напряженность H_{Z1} в этом случае для выбранной марки стали определяют по индукции B_{Z1} с помощью кривых (см. приложение 2), построенных для различных отношений площади воздушных частей к площади зубцов в данном сечении:

$$k_{п\ 1/3} = \frac{t_{Z1\ 1/3} l_1}{b_{Z1\ 1/3} l_{ст1k_c}} - 1. \quad (9.71)$$

3. Магнитное напряжение для спинки статора, А,

$$F_a = \xi L_a H_a, \quad (9.72)$$

где L_a — длина магнитной линии в спинке статора, м:

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{4p}, \quad (9.73)$$

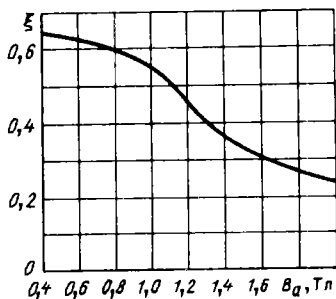


Рис. 9.22. Зависимость коэффициента ξ от индукции в ярме

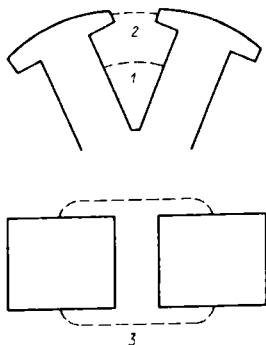


Рис. 9.23. К расчету потоков рассеяния полюсов

ξ — коэффициент, выбираемый по рис. 9.22 и учитывающий неравномерное распределение индукции по поперечному сечению спинки статора;
 H_a — напряженность магнитного поля в спинке статора, А/м.

Напряженность H_a определяют в соответствии с индукцией B_a по той же кривой намагничивания, что и для зубцов статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2l_{ст1} h_a k_c} . \quad (9.74)$$

4. Магнитное напряжение зубцов ротора, А,

$$F_{Z2} = H_{Z2} h_{Z2} . \quad (9.75)$$

Высота зубца ротора, м (рис. 9.20),

$$h_{Z2} = h_s + d_s . \quad (9.76)$$

Напряженность магнитного поля зубцов определяют из кривой намагничивания стали ротора по индукции в зубце B_{Z2} . Для роторов крупных синхронных машин для полюсов применяют сталь Ст3. У машины небольшой мощности полюсы изготавливают из стали 1211. Соответствующие кривые намагничивания даны в приложении 1. Индукцию B_{Z2} , Тл, и соответствующую ей напряженность магнитного поля H_{Z2} определяют для одного сечения зубца ротора, расположенного от коронки зубца на расстоянии $1/3 h_{Z2}$:

$$B_{Z2} = \frac{B_{\delta^1 Z2} l_{\delta}}{b_{Z2} l_{1/3} k_{cp}} , \quad (9.77)$$

где ширина зубца, м,

$$b_{z2\ 1/3} = -\frac{D - 2\delta - 2/3 h_{z2}}{D - 2\delta} \cdot t_{z2} - 0,94 d_s. \quad (9.78)$$

При $B_{z2} > 1,8$ Тл необходимо учитывать потоки, вытесняемые в паз, так же как это было показано для зубцов статора.

5. Магнитное напряжение полюса, А,

$$F_m = h_{mp} H_m, \quad (9.79)$$

где $h_{mp} = h_m + h_p$ — расчетная длина силовой линии в полюсе, м; H_m — напряженность поля у основания полюса, А/м.

Напряженность поля H_m определяют из кривой намагничивания по индукции в основании полюса B_m .

При определении индукции B_m следует, исходя из найденных размеров полюса (см. рис. 9.19), произвести уточнение потока рассеяния Φ_σ . Поток рассеяния Φ_σ можно подразделить на три составляющие (рис. 9.23):

1) поток рассеяния между внутренними поверхностями сердечников полюсов (линия 1);

2) поток рассеяния между внутренними поверхностями полюсных наконечников (линия 2);

3) поток рассеяния между торцевыми поверхностями полюсов (линия 3). В соответствии с этим Φ_σ , B_δ , можно найти по следующему выражению:

$$\Phi_\sigma = 4\lambda_{m\sigma} l'_m (F_\delta + F_{z1} + F_a + F_{z2}), \quad (9.80)$$

где l'_m — расчетная длина сердечника полюса, м; $\lambda_{m\sigma} = \lambda_{ml} + \lambda_{pl} + \lambda_{mb}$ — удельная магнитная проводимость для потока рассеяния на одну сторону полюса.

Удельная проводимость рассеяния между внутренними поверхностями сердечников полюсов

$$\lambda_{ml} = \frac{0,55 h_m}{\pi - b_m - \frac{\pi}{2p} (h_m + 2h_p + 2\delta)} \cdot 10^{-6}. \quad (9.81)$$

Удельная проводимость рассеяния между внутренними поверхностями полюсных наконечников

$$\lambda_{pl} = \left[1,4 \left(\frac{d_t}{a_p} - 0,25 \right) + 0,55 \left(\frac{c_p}{a_p} + 0,2 \right) \right] -$$

$$- 0,4 \left(\frac{c_p}{a_p} - 0,5 \right)^2 \cdot 10^{-6}. \quad (9.82)$$

Удельная проводимость рассеяния между торцевыми поверхностями

$$\lambda_{mb} = 0,37 \frac{b_m}{l'_m} 10^{-6}. \quad (9.83)$$

Здесь принято $c_p = (b_p - b_m)/2$; $a'_p = \tau - b_p - \pi d_t/p$; $d_t = h_p + \delta - b_p^2/4D$, при $d_t/a'_p < 0,025$ первым членом в (7.82) пренебрегают. Индукция, Тл,

$$B_m = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{l'_m b_m k_{cp}}. \quad (9.84)$$

Если индукция B_m в основании полюса превышает 1,6 Тл, то следует проводить уточненный расчет, учитывающий изменение потока по высоте полюса. Для этого определяют потоки в трех сечениях полюса: у его основания $\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$, у полюсного наконечника $\Phi'_m = \Phi + \Phi_\sigma \frac{\lambda_p l}{\lambda_{ms}}$ и в среднем сечении $\Phi_{msp} = (\Phi_m + \Phi'_m)/2$. Деля эти потоки на площадь поперечного сечения полюса, определяют индукции, а затем и магнитные напряженности H_m, H'_m, H_{msp} .

Расчетное значение напряженности полюса определяют по приближенной формуле

$$H_{mp} = \frac{1}{6} (H_m + H'_m + 4H_{msp}). \quad (9.85)$$

6. Магнитное напряжение стыка между полюсом и ярмом ротора определяют по индукции в основании полюса B_m , А:

$$F_{\delta mj} = 250 B_m. \quad (9.86)$$

7. Магнитное напряжение в осто-е или ободе ротора, А,

$$F_j = L_j H_j, \quad (9.87)$$

где $L_j = \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_{mp} - h_j)}{4p}$ — длина магнитной линии в осто-е, м; H_j — напряженность магнитного поля, А/м, определяемая по кривой намагничивания, исходя из индукции B_j .

Индукция в осто́ве или ободе магнитного колеса, Тл, с некоторым приближением может быть определена так:

$$B_j = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma}}{2l_j h_j k_{cp}}. \quad (9.88)$$

При нешихтованном ободе $k_{cp} = 1$.

Обычно в средних и крупных машинах магнитное напряжение F_j относительно мало и при расчете магнитной цепи не учитывается.

Просуммировав магнитные напряжения всех участков магнитной цепи, определяют МДС обмотки возбуждения на один полюс при холостом ходе:

$$F_{f0} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_a + F_{Z2} + F_m + F_{\delta mj} + F_j. \quad (9.89)$$

Проделав подобный расчет для ряда значений ЭДС, получают характеристику холостого хода $E = f(F_{f0})$. Для расчетов можно задаваться следующими значениями ЭДС: 0,5; 1,1; 1,2 и $1,3U_{ном.ф.}$. Полученные результаты сводят в таблицу (см. пример расчета). Характеристику холостого хода целесообразно выразить в относительных единицах и сравнить ее с нормальной характеристикой. При переводе в относительные единицы значение ЭДС в вольтах делят на номинальное фазное напряжение. Для МДС обмотки возбуждения за базовое значение принимают МДС, соответствующую номинальному фазному напряжению $U_{ном.ф.}$, к ней относят остальные значения МДС.

За нормальную характеристику холостого хода для явнополюсных синхронных машин принимают характеристику со следующими данными (в относительных единицах):

$E_{\bullet}$	0,58	1	1,21	1,33	1,44	1,46	1,51
$F_{f0\bullet}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5

Расчетная и нормальная характеристики должны быть близки друг к другу, но их полное совпадение не является обязательным.

9.12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МДС РЕАКЦИИ ЯКОРЯ

Для определения МДС обмотки возбуждения, необходимой для создания нужного потока при нагрузке, нужно учитывать влияние реакции якоря. Амплитуда первой гармоники МДС реакции якоря при токе I_{ϕ}

$$F_a = 0,45m \frac{w_1 k_{об1}}{p} I_{\phi}. \quad (9.90)$$

Для количественного учета влияния реакции якоря на магнитное поле машины обычно МДС F_a разлагают на две составляющие: продольную $F_d = F_a \sin \psi$, максимум которой совпадает с осью полюсов, и поперечную $F_q = F_a \cos \psi$, максимум которой совпадает с осью, проходящей через середину межполюсного пространства. Угол ψ является углом между током I_ϕ и ЭДС E_0 . Магнитодвижущие силы якоря и обмотки возбуждения имеют различное пространственное распределение, и поэтому одинаковые их значения создают различные потоки. Для удобства совместного рассмотрения одну из МДС необходимо привести к другой. Так как обычно при расчетах используется характеристика холостого хода, то целесообразно синусоидальные МДС якоря привести к прямоугольной МДС обмотки возбуждения. Для этого F_d и F_q заменяются эквивалентными МДС обмотки возбуждения F_{ad} и F_{aq} . Эквивалентные МДС F_{ad} и F_{aq} определяются исходя из того, чтобы потоки первой гармоники, создаваемые ими, были соответственно равны потокам первой гармоники от МДС F_d и F_q . При переходе от F_d и F_q к F_{ad} и F_{aq} вводят коэффициенты k_{ad} и k_{aq} :

$$\left. \begin{aligned} F_{ad} &= k_{ad} F_d; \\ F_{aq} &= k_{aq} F_q. \end{aligned} \right\} \quad (9.91)$$

Коэффициенты k_{ad} и k_{aq} зависят от отношений $b_p/\tau = \alpha$ и δ/τ . Они могут быть найдены из рис. 9.24.

В ненасыщенной машине можно принимать, что продольное и поперечное поля существуют независимо и не оказывают взаимного влияния.

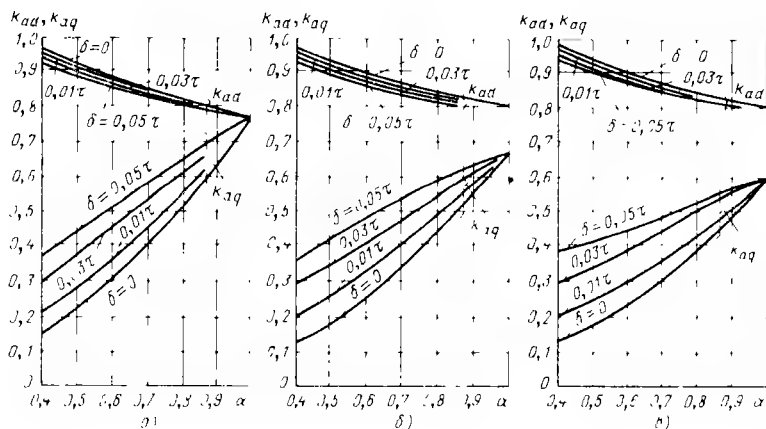
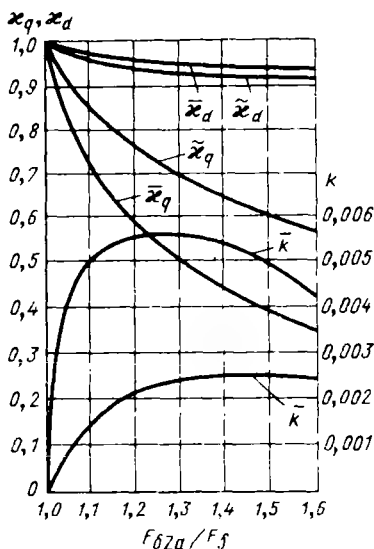


Рис. 9.24. Кривые для определения коэффициентов k_{ad} и k_{aq} :

а - при $\delta_m/\delta = 1$; б - при $\delta_m/\delta = 1.5$; в - при $\delta_m/\delta = 2$

Рис. 9.25. Зависимость коэффициентов κ_d , κ_q и k от $F_{\delta Z_a}/F_{\delta}$



ния друг на друга. При наличии насыщения такое допущение может внести в расчет погрешности. Однако учет взаимного влияния продольного и поперечного потоков в насыщенной машине связан с большими трудностями и может быть сделан приближенно.

На основе анализа магнитных полей в синхронных машинах при нагрузке и насыщении были определены коэффициенты κ_d и κ_q (рис. 9.25), на которые нужно умножить МДС F_{ad} и F_{aq} , чтобы получить соответствующие их значения $F'_{ad} = \kappa_d F_{ad}$ и $F'_{aq} = \kappa_q F_{aq}$ при учете насыщения. Эти коэффициенты получены в функции $F_{\delta Z_a}/F_{\delta}$, т. е. отношения суммы магнитных напряжений воздушного зазора, зубцов и спинки статора к магнитному напряжению воздушного зазора. Коэффициенты $\bar{\kappa}_d$ и $\bar{\kappa}_q$ получены для машин с равномерным воздушным зазором, а $\tilde{\kappa}_d$ и $\tilde{\kappa}_q$ — для машин, у которых зазор изменяется согласно уравнению

$$\delta_x = \frac{\delta}{\cos(x\pi/\tau)}, \quad (9.92)$$

где x — расстояние от оси полюса до рассматриваемой точки.

Коэффициенты $\tilde{\kappa}_d$ и $\tilde{\kappa}_q$ можно с некоторым приближением применить и для машин, у которых $\delta_m/\delta = 1,5$.

Как известно, поперечная реакция якоря вызывает ослабление поля под одним краем полюса и усиление его под другим. В ненасыщенной машине результирующий поток полюса при этом не изменяется. При насыщении магнитной цепи увеличение потока под одним из краев полюса происходит в меньшей мере, чем ослабление под другим, и результирующий поток (его первая гармоника) уменьшается. Для компенсации размагничивающего действия поперечной реакции якоря необходимо увеличивать МДС обмотки возбуждения на F_{qd} .

При равномерном воздушном зазоре F_{qd} можно определить по формуле

$$F_{qd} = \bar{k} \frac{b_p}{\delta} F_a \cos \psi = \bar{k} \frac{b_p}{\delta} F_q, \quad (9.93)$$

а при зазоре, изменяющемся по (9.92), — по формуле

$$F_{qd} = \tilde{k} \frac{\tau}{\delta} F_q. \quad (9.94)$$

На рис. 9.25 даны зависимости $\bar{k}$ и $\tilde{k}$ от отношения $F_{\delta Z_a} / F_{\delta}$.

Количественный учет реакции якоря при определении МДС обмотки возбуждения производится с помощью векторных диаграмм (см. § 9.14).

9.13. ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ СТАТОРА ДЛЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ

При построении векторных диаграмм, а в дальнейшем и при расчете характеристик синхронных машин необходимо знать параметры обмотки статора.

Активное сопротивление обмотки статора, Ом,

$$r_1 = \frac{\rho_{\text{ж}} w_1 l_{\text{ср}1}}{n_{\text{эл}} q_{\text{эл}} a}, \quad (9.95)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — удельное сопротивление проводника обмотки; $q_{\text{эл}} n_{\text{эл}}$ — сечение эффективного проводника, м^2 ; $l_{\text{ср}1} = 2(l_1 + l_n)$ — средняя длина витка обмотки статора.

Длину лобовой части l_n определяют при жестких секциях по (8.139), а для выпуклых обмоток — по (8.136).

Активное сопротивление фазы в относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{\text{ном.ф}}}{U_{\text{ном.ф}}}. \quad (9.96)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора x_{σ} обусловлено полями рассеяния пазовой и лобовой частей обмотки, а также высшими гармониками поля в воздушном зазоре (дифференциальное рассеяние) и определяется по следующей формуле:

$$x_{\sigma} = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l_{\delta}}{\rho q_1} (\lambda_{\text{п.к}} + \lambda_n + \lambda_d), \quad (9.97)$$

где $\lambda_{п.к.}$, $\lambda_{л.}$, $\lambda_{д.}$ — коэффициенты удельной (на единицу длины) проводимости пазового, лобового и дифференциального рассеяния.

Коэффициент удельной проводимости паза $\lambda_{п.к.}$ состоит из двух составляющих: пропорциональной проводимости между стенками паза $\lambda_{п.}$ и проводимости по коронкам зубцов $\lambda_{к.}$:

$$\lambda_{п.к.} = \lambda_{п.} + \lambda_{к.} \quad (9.98)$$

где $\lambda_{п.}$ в зависимости от конфигурации паза определяют по табл. 8.24;

$$\lambda_{к.} = \left[a\lambda'_{к.} + \left(0,22 + 0,32 \sqrt{\frac{t_{Z1} - b_{ш}}{b_{ш}}} \right) (1 - a) \right] k'_{\beta}, \quad (9.99)$$

где t_{Z1} — зубцовое деление статора; $b_{ш}$ — ширина шлица паза (при открытых пазах $b_{ш} = b_{п1}$); a — коэффициент полюсного перекрытия (из § 9.9); k'_{β} — по (8.156); $\lambda_{к.}$ — по рис. 9.26 в зависимости от отношения $b_{ш}/(\delta' k_{\delta})$.

При больших отношениях $b_{ш}/(\delta' k_{\delta})$ проводимость $\lambda'_{к.}$ становится отрицательной, что приводит к уменьшению $\lambda_{п.к.}$. Это уменьшение связано с искривлением силовых линий поля рассеяния вблизи воздушного зазора по сравнению с прямолинейным законом их распределения, как это было принято при выводе формулы для $\lambda_{п.}$.

Коэффициент проводимости лобового рассеяния определяют по (8.159).

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния приближенно определяют по формуле

$$\lambda_{д.} = 0,03 \frac{\tau a_{\delta}}{\delta' k_{\delta} q_1}. \quad (9.100)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния в относительных единицах

$$x_{\sigma*} = x_{\sigma} \frac{I_{ном.ф}}{U_{ном.ф}}. \quad (9.101)$$

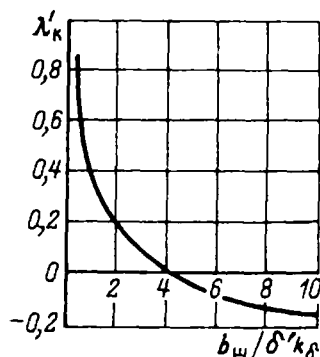


Рис. 9.26. Зависимость $\lambda'_{к.}$ от отношения $b_{ш}/\delta'' k_{\delta}$

Ненасыщенное значение индуктивного сопротивления продольной реакции якоря в относительных единицах

$$x_{ad*} = (k_{ad} F_{aном}) / (k_{\mu 0} F_{\delta 0}), \quad (9.102)$$

где $F_{a ном}$ — МДС статора при номинальном токе по (9.90); $F_{\delta 0}$ — магнитное напряжение воздушного зазора при $E = U_{ном.ф}$; k_{ad} — по рис. 9.24; $k_{\mu 0} = F_{f0} / F_{\delta}$ — коэффициент, учитывающий влияние магнитных напряжений стали и зазора между полюсом и ярмом для ненасыщенной машины; он может быть найден из расчета магнитной цепи для точки, соответствующей $E = 0,5 U_{ном.ф}$.

Ненасыщенное значение индуктивного сопротивления поперечной реакции якоря в относительных единицах

$$x_{aq*} = \frac{k_{aq} F_{aном}}{k_{\mu 0} F_{\delta 0}} \frac{1 + k_{\delta}}{2}. \quad (9.103)$$

Коэффициент k_{aq} определяют по рис. 9.23; k_{δ} — коэффициент воздушного зазора — по (9.66).

Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси

$$x_{d*} = x_{ad*} + x_{\sigma*}. \quad (9.104)$$

Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси

$$x_{q*} = x_{aq*} + x_{\sigma*}. \quad (9.105)$$

9.14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МДС ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ НАГРУЗКЕ. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Для определения МДС обмотки возбуждения при нагрузке используют векторные диаграммы (рис. 9.27).

При построении векторных диаграмм целесообразно использовать относительные значения параметров, тока, напряжения, ЭДС и МДС.

Для более точного определения потока рассеяния полюсов при нагрузке необходимо иметь частичные характеристики намагничивания:

$$\Phi_* = E_* = f(F_{\delta Z a*}), \quad \Phi_{\sigma*} = f(F_{\delta Z a*}), \quad \Phi_{m*} = f(F_{mj*}).$$

Здесь принято $\Phi_* = \Phi / \Phi_b$, $\Phi_{\sigma*} = \Phi_{\sigma} / \Phi_b$, $\Phi_{m*} = \Phi_m / \Phi_b$; Φ_b — базовое значение потока, равное потоку при номинальном фазном напряжении;

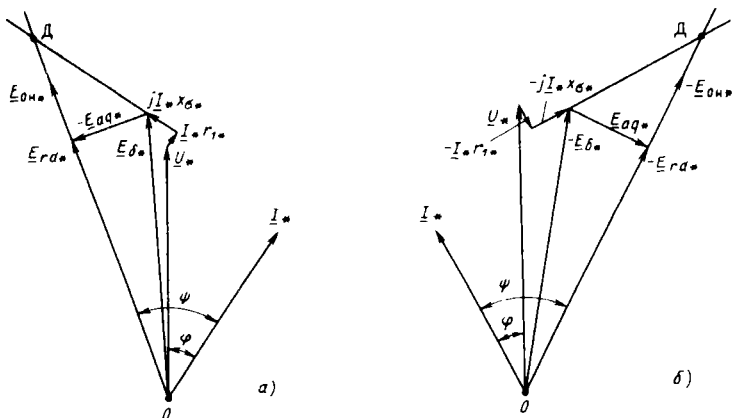


Рис. 9.27. Векторные диаграммы:

а – для генератора; б – для двигателя

$$F_{\delta Z a*} = \frac{F_{\delta Z a}}{F_{f\delta}} = \frac{F_{\delta} + F_{Z1} + F_a + F_{Z2}}{F_{f\delta}};$$

$$F_{mj*} = \frac{F_{mj}}{F_{f\delta}} = \frac{F_m + F_{\delta mj} + F_l}{F_{f\delta}};$$

$$F_{f0*} = \frac{F_{f0}}{F_{f\delta}} = \frac{F_{\delta Z a} + F_{mj}}{F_{f\delta}};$$

$F_{f\delta}$ – базовое значение МДС, равное МДС обмотки возбуждения при холостом ходе и номинальном фазном напряжении. На рис. 9.28 все характеристики имеют одинаковые масштабы по соответствующим осям координат.

Для оценки насыщения машины удобно построить зависимость $E_* = f(F_{\sigma Z a}/F_{\delta})$ (рис. 9.29). Указанные графики строятся по данным расчета магнитной цепи машины.

Диаграмма при заданных номинальных значениях тока ($I_{\text{ном.ф}*} = 1$), напряжения ($U_{\text{ном.ф}*} = 1$) и угла между ними строится следующим образом.

1. В выбранном масштабе для тока и напряжения откладывают вектор номинального фазного тока и под углом φ к нему – вектор фазного напряжения.

2. К вектору напряжения пристраивают векторы падения напряжения I_*r_{1*} , $jI_*x_{\sigma*}$ для генератора и $-I_*r_{1*}$, $-jI_*x_{\sigma*}$ для двигателя, в резуль-

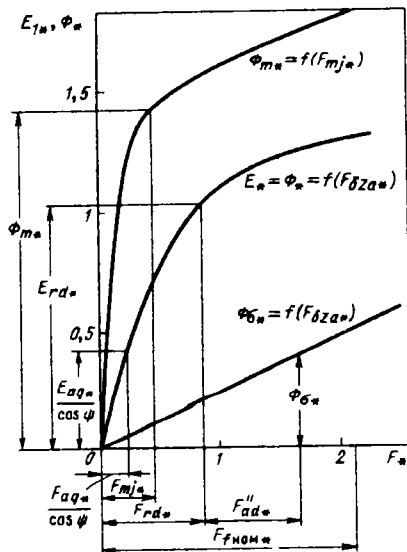


Рис. 9.28. Частичные характеристики намагничивания

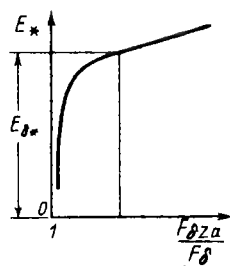


Рис. 9.29. Зависимость E от отношения $F_{\delta Z a} / F_{\delta}$

тате чего находят ЭДС $E_{\delta*}$, которая индуцируется в обмотке якоря при нагрузке. При $I_* = 1$ векторы падения напряжения численно равны r_{1*} и $x_{\sigma*}$. В крупных машинах падение напряжения в активном сопротивлении r_{1*} относительно мало и им можно пренебречь.

3. По $E_{\delta*}$ из зависимости $E_* = f(F_{\delta Z a} / F_{\delta})$ определяют отношение $F_{\delta Z a} / F_{\delta}$, по которому из рис. 9.25 находят коэффициенты κ_q , κ_d и k .

4. Определяют значение результирующей ЭДС по продольной оси E_{rd} и угол ψ . Для этой цели находят МДС (в относительных единицах):

$$\frac{F_{aq*}}{\cos \psi} = \frac{\kappa_q k_{aq} F_a}{F_{f6}} = \kappa_q k_{aq} F_{a*},$$

где

$$F_{a*} = \frac{0,45 m w_1 k_{об1} I_{ном.ф}}{p F_{f6}}.$$

Отложив F_{aq*} по оси абсцисс характеристики $E_* = f(F_{\delta Z a*})$, на оси ординат получают ЭДС, равную $E_{aq*} / \cos \psi$ (см. рис. 9.28). Добавляя эту ЭДС к вектору $j I_* x_{\sigma}$ (или $-j I_* x_{\sigma*}$), получают точку Д (см. рис. 9.27), через которую пройдет линия, совпадающая с направлением

ЭДС E_{rd*} (или $-E_{rd*}$). Угол между током I_* и этой линией является углом ψ .

5. Опустив перпендикуляр из конца вектора $jI_{x\sigma}$ (или $-jI_{x\sigma}$) на линию ОД, находят ЭДС E_{rd*} , наводимую в обмотке якоря результирующим потоком по продольной оси $E_{rd*} = \Phi_{rd*}$. Из характеристики $E_* = f(F_{\delta Z a*})$ по E_{rd} определяют МДС F_{rd*} (см. рис. 9.28).

6. Определяют МДС продольной реакции якоря:

$$F_{ad*}'' = F_{ad*}' + F_{qd*} = \kappa_d k_{ad} F_{a*} \sin \psi + k \frac{\tau}{\delta} F_{a*} \cos \psi.$$

7. По сумме $F_{rd*} + F_{ad*}''$ по характеристике $\Phi_{\sigma*} = f(F_{\delta Z a*})$ определяют поток рассеяния полюса $\Phi_{\sigma*}$.

8. По потоку полюса $\Phi_{m*} = \Phi_{rd*} + \Phi_{\sigma*}$ из характеристики $\Phi_{m*} = f(F_{mj*})$ определяют сумму магнитных напряжений ротора F_{mj*} .

9. Находят МДС обмотки возбуждения при нагрузке в относительных единицах

$$F_{f_{ном}} = F_{rd*} + F_{ad*}'' + F_{mj*}$$

и в физических единицах (амперах)

$$F_{f_{ном}} = F_{f_{ном}} F_{fb}.$$

Из характеристики холостого хода $E_* = f(F_{f0*})$ по $F_{f_{ном}}$ определяют ЭДС $E_{0н*}$, наводимую в обмотке статора при холостом ходе, а затем находят изменение напряжения на выводах машины (для генератора):

$$\Delta U_* = E_{0н*} - 1.$$

9.15. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обмотка возбуждения синхронных машин подключается к источнику постоянного тока. До недавнего времени для питания обмоток возбуждения применялись специальные генераторы постоянного тока — возбудители.

В настоящее время для возбуждения синхронных машин все чаще стали применять статические устройства. Новые серии синхронных машин общего назначения 13–21-го габаритов (СД2, СГ2, СДН2 и т.д.) оснащены комплектными тиристорными возбудительными устройствами (ТВУ). Особенностью ТВУ является бесконтактное и быстродействующее управление током возбуждения во всех эксплуатационных режимах и наличие автоматического регулирования возбуждения. Это

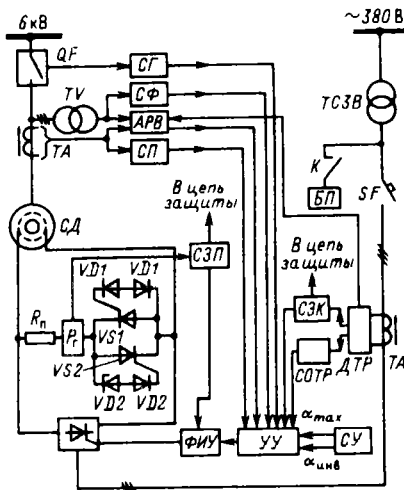


Рис. 9.30. Структурная схема тиристорного возбудителя синхронного двигателя (питание от сети 380 В):

СГ – схема гашения поля; *СФ* – схема форсировки возбуждения; *АРВ* – автоматический регулятор возбуждения; *СП* – схема пуска; *СЗП* – схема защиты пускового сопротивления; *ФИУ* – фазоимпульсное устройство; *УУ* – устройство управления; *БП* – блок питания; *СЗК* – схема защиты от коротких замыканий; *СОТР* – схема ограничения тока ротора; *ДТР* – датчик тока ротора; *СУ* – схема установок угла регулирования; *К* – герконное реле

повышает надежность и улучшает использование машин. Кроме того, КПД тиристорных возбудительных устройств выше, чем генераторов постоянного тока.

На рис. 9.30 дана структурная схема одного из применяемых в настоящее время ТВУ. В ТВУ питание обмотки возбуждения происходит через тиристорный преобразователь или от сети переменного тока с напряжением 380 В через согласующий трансформатор ТСЗВ, или от дополнительной трехфазной обмотки, расположенной на статоре. Преобразователи осуществляют выпрямление переменного тока в постоянный и имеют трехфазную схему со средним выводом при выпрямленном напряжении до 100 В или трехфазную мостовую при напряжении выше 100 В. Параллельно обмотке возбуждения синхронного двигателя через тиристорный ключ подключен пусковой резистор.

Управление тиристорным преобразователем осуществляется фазоимпульсным устройством (ФИУ).

Функции управления и регулирования в ТВУ осуществляет электронная система управления, в комплект которой входит ряд блоков, показанных на рисунке.

В табл. 9.10 даны номинальные данные тиристорных возбуждательных устройств серии ТВУ для синхронных двигателей.

Кроме того, для синхронных машин 13-го и 14-го габаритов разработаны ТВУ с питанием от дополнительной обмотки статора. Выпрямленное напряжение этих устройств 25–36 В при токе 140–170 А.

Иногда для возбуждения синхронных машин применяют бесконтактные системы. В этом случае к обмотке возбуждения непосредственно (без контактных колец) подводят выпрямленное напряжение от машины переменного тока небольшой мощности (синхронной или асинхронной), якорь которой располагается на одном валу с синхрон-

Таблица 9.10

Тип	Номинальные данные ТВУ				Пусковое сопротивление $R_{п}$, Ом
	I , А	U , В	P , кВт	U_{max} , В	
ТВУ-46-320	320	46	14,7	80	0,385
ТВУ-65-320	320	65	20,8	115	0,51
ТВУ-80-320	320	80	25,6	140	0,64
ТВУ-105-320	320	105	33,6	185	0,8
ТВУ-137-320	320	137	43,8	240	1,02
ТВУ-166-320	320	166	52	290	1,44
ТВУ-195-320	320	195	62	340	1,44
ТВУ-217-320	320	247	79	435	1,6

ной машиной. Выпрямители закрепляют на роторе, и они вращаются вместе с ним.

При проектировании обмоток возбуждения для улучшения теплоотдачи и заполнения катушки медью стремятся увеличить сечение проводников обмотки и уменьшить число ее витков при соответствующем увеличении тока возбуждения.

В связи с этим напряжение для питания обмотки возбуждения выбирается низким и в некоторых случаях нестандартным. В качестве предварительных значений можно наметить следующую шкалу напряжений: 25, 35, 45, 65, 80, 100, 115, 160, 200, 230 В, которая, однако, не является строго обязательной, и в зависимости от конкретной схемы возбуждения напряжения могут иметь иные значения. Меньшие значения напряжения выбирают для машин небольшой мощности. Учитывая переходное падение напряжения $\Delta U_{щ}$ в контакте между щеткой и кольцом, напряжение на обмотке возбуждения U_f следует принимать на 1–2 В меньшим, чем напряжение ТВУ.

Обмотки возбуждения выполняют однорядными (рис. 9.31) и многорядными (рис. 9.32). Многорядные катушки в сечении имеют скошенную форму.

Для синхронных машин мощностью от сотен киловатт и выше, как правило, применяют однорядные обмотки, которые выполняют из полосовой неизолированной меди сечением больше 30 мм², намотанной на ребро. Однорядные обмотки более надежны и вследствие лучшего охлаждения допускают большие плотности тока, чем многорядные. Многорядные обмотки применяют для машин небольшой мощности.

Изоляция катушек однорядных обмоток возбуждения для машин мощностью свыше 100 кВт дана в табл. 9.11 в соответствии с рис. 9.33. В табл. 9.12 и на рис. 9.34 представлена изоляция многорядных обмоток для машин мощностью менее 100 кВт.

При расчете обмотки возбуждения ее МДС для запаса увеличивается на 10–20% по сравнению со значением, полученным из векторной ди-

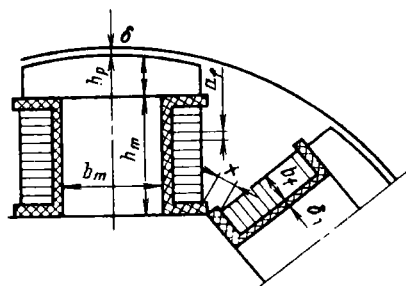


Рис. 9.31. Однорядные обмотки возбуждения синхронных машин

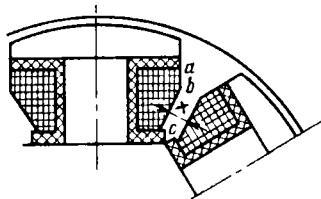


Рис. 9.32. Многорядные обмотки возбуждения

Таблица 9.11. Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью свыше 100 кВт

Позиция на рис. 9.33	Материал		Число слоев	Общая толщи- на, мм	Примечание
	Наименование	Толщи- на, мм			
1	Медь полосовая	—	—	—	—
2	Бумага асбестовая электроизоляцион- ная	0,2	2	0,4	Для классов нагрево- стойкости А, Е, В применяется лакиров- ка глфталебакелито- вым лаком, для клас- сов F и H — лаком на кремнийорганиче- ской основе
3	Миканит формовоч- ный (или микафо- лий, или стекломи- кафолый)	0,5 (0,2)	3	1,5 (1,6)	Для обмоток в тропи- ческом и химически стойком исполнении применять только стек- ломикафолый или фор- мовочный миканит
4, 6	Миканит прокладоч- ный	0,5	1	0,5	Промежутки между шайбами и сердечни- ком заполняются электроизоляцион- ной замазкой
5	Стеклотекстолит	5	1	5	Для класса нагрево- стойкости А нормаль- ного исполнения
7	„	8	1	8	вместо стеклотексто- лита применяется гетинакс

Рис. 9.33. Изоляция катушки однорядной обмотки возбуждения

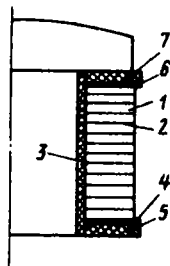
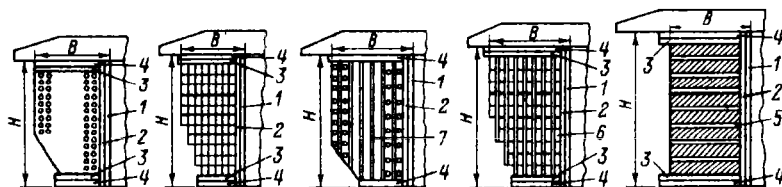


Рис. 9.34. Изоляция многорядных катушек обмотки возбуждения



аграммы для номнального режима:

$$F'_{f_{ном}} = (1,1 \div 1,2) F_{f_{ном}} \quad (9.106)$$

Сечение проводника обмотки возбуждения q_f , м^2 , предварительно определяют по формуле

$$q_f = \frac{\rho_{\text{ж}} 2p F'_{f_{ном}} l_{f_{ср}}}{U_f} \quad (9.107)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — удельное сопротивление меди при рабочей температуре обмотки, $\text{Ом} \cdot \text{м}$; для однослойной обмотки из неизолированной меди и изоляции класса нагревостойкости В $\rho_{130} = 1/39 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, для многослойных обмоток при изоляции класса нагревостойкости В $\rho_{120} = 1/40 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; U_f — напряжение на обмотке возбуждения, В; $l_{f_{ср}}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения, м.

Предварительно средняя длина витка, м, может быть принята равной: для многорядных обмоток

$$l_{f_{ср}} = 2(l_m + b_m + 4\delta_1) + \pi b_{\text{к.т.}} \quad (9.108)$$

для однорядных:

а) с лобовой частью в виде полуокружности (рис. 9.35)

$$l_{f_{ср}} = 2(l_m - 2\delta'') + \pi(b_m + 2\delta_1 + b_f); \quad (9.109)$$

Таблица 9.12. Изоляции катушек ротора явнополюсных синхронных машины мощностью до 100 кВт

Позиция рис. 9.34	Классы нагревостойкости А и В нормального исполнения		Классы нагревостойкости А и В усиленного влагостойкого испол- нения		Классы нагревостойкости F и H всех ис- полнений и классе нагревостойкости В химически стойкого и тропического ис- полнений	
	Наименование материала	Толщи- на, мм	Число слоев	Наименование материала	Толщи- на, мм	Число слоев
1	Слюдинитофолий	0,12	16	Микафолий (или формовочный микалит)	0,2 (0,5)	8 (3)
2	Бумага телефонная лакированная	0,07	3	Бумага телефон- ная лакировочная	0,07	3
3	Миканит прокла- дочный	0,5	1	Миканит прокла- дочный	0,5	1
4	Гетинакс	3-5	1	Гетинакс	3-5	1
5	Бумага асбесто- вая, дополните- льно лакированная	0,3	1 между витками	Бумага асбесто- вая, дополните- льно лакированная	0,3	1 между витками
6	Слюдинит гибкий	0,2	1	Миканит гибкий	0,2	1 между слоями
7	Бумага конденса- торная	0,03	1	Стекломинеральная ткань	0,025	То же
				Стекломинеральный материал	0,22	1 между слоями
				Стекломинеральный материал	0,025	То же

Примечание. Материалы (миканиты, стекломиканиты, стеклотекстолиты) должны иметь соответствующие выбранным классу изоляции.

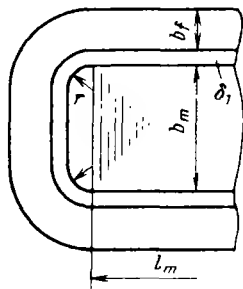
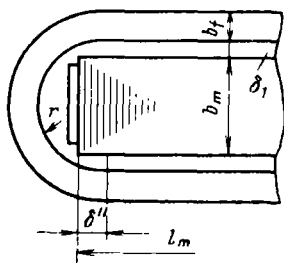
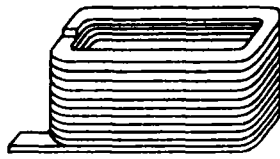
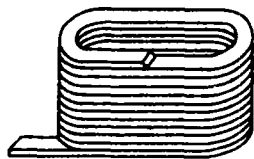


Рис. 9.35. К определению средней длины витка однорядных обмоток с лобовой частью в виде полуокружности

Рис. 9.36. Лобовая часть с двумя закруглениями

б) с лобовой частью в виде прямолинейного участка с двумя закруглениями (рис. 9.36); применяют при $b_m > 20$ см:

$$l_{fcp} = 2(l_m + b_m - 2r) + \pi(2r + 2\delta_1 + b_f). \quad (9.110)$$

В (9.108)–(9.110) δ_1 – односторонняя толщина изоляции полюса: $\delta_1 \approx (1,5 \div 2,0) \cdot 10^{-3}$, м; δ_1 можно также выбрать по табл. 9.11 и 9.12; δ'' – расстояние от центра закругления с радиусом r до края штампованной части полюса:

b_m , м	δ'' , м	b_m , м	δ'' , м
До 0,06	0,01	0,12–0,15	0,02
0,06–0,1	0,0125	0,15–0,2	0,03
0,1–0,12	0,015		

r – радиус закругления, м: $r \approx b_f$; $b_{к.т}$ – толщина катушки обмотки возбуждения, м; b_f – ширина проводника обмотки, м.

Предварительно, пока не известны размеры катушки обмотки и размеры проводника, можно принять:

для многорядных обмоток $b_{к.т} \approx 2,5 \cdot 10^{-2}$ м при $D \leq 0,3$ м и $b_{к.т} \approx 5 \cdot 10^{-2}$ м при $D > 0,3$ м;

для однорядных обмоток $b_f \approx (0,05 \div 0,1)$ т.

Напряжение U_f может быть задано или его следует выбрать. При выборе напряжения, подводимого к обмотке возбуждения, необходимо учитывать некоторые особенности, связанные с выполнением и охлаждением обмотки. Для машин мощностью до 100 кВт, в которых применяют многорядные обмотки, напряжение возбуждения следует выбрать таким, чтобы получить сечение прямоугольных проводников возможно большим, но не выше 30–40 мм². Для малых машин при сечении проводника меньше 2,5 мм² применяют круглые провода.

В крупных машинах (при $P_{\text{ном}} > 100$ кВт), для которых следует применять однорядные обмотки, сечение прямоугольных проводников должно быть больше 30–40 мм², но не выше 300 мм². По конструктивным и технологическим требованиям отношение сторон проводника должно быть не больше 10–15. Намотку обмотки ведут на ребро. Допустимая плотность тока в проводниках обмотки зависит от класса нагревостойкости изоляции и условий охлаждения. В современных синхронных машинах изоляция обмоток возбуждения имеет класс нагревостойкости В или F.

Однорядные обмотки выполняют из неизолированной прямоугольной меди. Изоляция витков состоит из двух слоев асбестовой бумаги общей толщиной после опрессовки 0,3 мм, приклеенной лаком к широкой стороне проводника.

Для многорядных обмоток применяют изолированные проводники с изоляцией класса нагревостойкости В или F, например марки ПСД.

Предварительно значения плотности тока, А/мм², в проводниках обмотки возбуждения J_f можно выбрать в следующих пределах:

Для однорядных обмоток крупных машин $(3,5 - 5,3) \cdot 10^6$

Для многорядных обмоток $(3,2 - 3,8) \cdot 10^6$

Меньшие значения плотности тока выбирают для машин, имеющих большую длину.

Ток возбуждения

$$I_{f\text{ном}} = q_f J_f. \quad (9.111)$$

Определив ток возбуждения, найдем число витков в катушке полюса обмотки возбуждения:

$$w_f = F_{f\text{ном}} / I_{f\text{ном}}. \quad (9.112)$$

В некоторых случаях, когда задается ток возбуждения $I_{f\text{ном}}$, витки обмотки могут быть определены по (9.112), исходя из МДС $F'_{f\text{ном}}$. Поперечное сечение проводников обмотки по выбранной плотности тока определяют как

$$q_f = I_{f\text{ном}} / J_f. \quad (9.113)$$

Для многорядных обмоток по найденному сечению проводника (по табл. ПЗ.3) определяют его размеры $a_f \times b_f$. Отношение сторон проводников b_f/a_f должно находиться в пределах 1,5–2.

Проведя раскладку проводников по слоям, сделаем масштабный эскиз, по которому определим размеры катушки. Намотку можно производить как на широкую, так и на узкую стороны проводника.

Размеры проводников при этом принимают с учетом изоляции для выбранной марки провода (по табл. ПЗ.4).

Для размещения катушек на полюсах, а также для прохождения охлаждающего воздуха между катушками соседних полюсов в нижней их части должно быть предусмотрено расстояние не менее 0,7–1,0 см (расстояние x на рис. 9.32).

Для однорядных обмоток меньший размер прямоугольного проводника определяют, исходя из найденного числа витков и выбранной ранее высоты полюсного сердечника h_m :

$$a_f = \frac{h_m - \delta_{к.п}}{w_f + 1} - \delta_{п.} \quad (9.114)$$

где $\delta_{п.}$ — изоляция между витками: $\delta_{п.} \approx 0,3 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta_{к.п.}$ — суммарная толщина изоляции обмотки от полюсного наконечника и ярма ротора: для машин $P_{ном} < 100$ кВт $\delta_{к.п.} = (7 \div 10) \cdot 10^{-3}$ м; для машин $P_{ном} > 100$ кВт $\delta_{к.п.} = (10 \div 15) \cdot 10^{-3}$ м (большие значения принимают для крупных машин).

По сечению q_f определяют возможные размеры широкой части провода, м:

$$b_f = q_f / a_f. \quad (9.115)$$

Далее по табл. 3.6 выбирают близкие к найденным размеры стандартной прямоугольной меди $a_f \times b_f$ и q_f , затем проверяют размещение обмотки на полюсе. Если обмотка не размещается на полюсе, то следует или несколько изменить размеры проводника, или изменить высоту полюса. После того как определились размеры проводника обмотки возбуждения, необходимо проверить расстояние между катушками соседних полюсов (расстояние x на рис. 9.31 и 9.32):

$$x \approx \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_p - 2h_m)}{2p} - b_m - 2\delta_1 - 2b_f. \quad (9.116)$$

Это расстояние должно быть не менее 7 мм.

Для проверки нагрева обмотки возбуждения уточняют плотность тока

$$J_f = I_{fном} / q_f \quad (9.117)$$

и определяют превышение температуры, °С, по нижеприведенным формулам.

Для многоядных обмоток

$$\Delta\vartheta_f = \frac{\left(2,8 + \frac{l_1}{\tau}\right) F_{f\text{ном}} J_f}{76 \cdot 10^8 \Pi_f (1,6 + \sqrt{V_p})} \times \left[1 + \frac{\delta_{пф} (m - 0,5) (1,6 + \sqrt{V_p}) \cdot 10^2}{2,8 + \frac{l_1}{\tau}} \right], \quad (9.118)$$

где $\delta_{пф}$ — двусторонняя изоляция проводников, м; m — число слоев в наиболее широкой части катушки; Π_f — периметр боковой части катушки, м (abc на рис. 9.32); V_p — окружная скорость вращения ротора, м/с.

Для одноядных катушек

$$\Delta\vartheta_f = \frac{3 \cdot 10^{-10} \left(2,8 + \frac{l_1}{\tau}\right) b_f J_f^2}{1,6 + \sqrt{V_p}} \quad (9.119)$$

Согласно ГОСТ 183-74 допустимое превышение температуры для многоядных обмоток равно 80 °С при изоляции класса нагревостойкости В и 100 °С при изоляции класса нагревостойкости F. Для одноядных обмоток с оголенными поверхностями допустимые превышения температуры соответственно равны 90 и 110 °С.

При расчете машины допустимое превышение температуры следует принимать на 10–15 °С меньше по сравнению с рекомендованной ГОСТ.

Если превышение температуры получится больше или, наоборот, много меньше допустимого, то необходимо произвести пересчет обмотки возбуждения, что может потребоваться и в том случае, если расстояние x будет мало.

При пересчете можно попытаться изменить значения некоторых из рекомендуемых ниже величин: плотности тока в обмотках, соотношения между сторонами прямоугольного проводника, высоты и в небольших пределах (3–6%) ширины полюсного сердечника, сечения проводника за счет изменения напряжения, подводимого к обмотке возбуждения, воздушного зазора.

После того как окончательно установлены размеры обмотки возбуждения, уточняют размеры полюса, среднюю длину витка по (9.108) – (9.110) и ток возбуждения $I_{f\text{ном}}$.

Определяют сопротивление обмотки возбуждения:

$$r_f = \rho_{\vartheta} \frac{2p w_f l_{fcp}}{q_f} \quad (9.120)$$

Значения ρ_{ϑ} см. в табл. 5.1.

Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при номинальной нагрузке и температуре 130 °С (или 120 °С для многорядных обмоток)

$$U'_{fном} = r_{f130} I_{fi} \quad (9.121)$$

Коэффициент запаса возбуждения (находится в пределах 1,1–1,2)

$$k_f = U_{fi} / (U'_{fном} + \Delta U_{ш}), \quad (9.122)$$

где $U_{fном}$ – номинальное напряжение ТВУ.

9.16. ПАРАМЕТРЫ И ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ

Параметрами машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток. В § 9.13 определены некоторые параметры обмотки статора. Здесь даются расчетные формулы для нахождения параметров роторных обмоток и параметров обмотки якоря, которые необходимы для расчетов переходных и несимметричных режимов работы машины. Приведенные ниже формулы дают значения параметров в относительных единицах. Параметры цепей ротора приведены к числу витков обмотки якоря.

Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения

$$x_{f*} = 1,27 k_{ad} x_{ad*} \left(1 + \frac{4k_{\mu 0} F_{\delta 0} l'_m \Sigma \lambda}{\Phi_{\delta}} \right), \quad (9.123)$$

где l'_m – расчетная длина сердечника полюса, м, по (9.52); $F_{\delta 0}$ и Φ_{δ} – магнитное напряжение воздушного зазора и поток при $E = U_{ном.ф}$;

$$\Sigma \lambda = \lambda_{pl} + \lambda_{ml}/1,53 + \lambda_{mb}/2,65;$$

λ_{pl} , λ_{ml} , λ_{mb} определяются по (9.81)–(9.83)

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения

$$x_{of*} = x_{f*} - x_{ad*} \quad (9.124)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния демпферной (пусковой) обмотки по продольной оси

$$x_{kd*} = 7,9 \frac{F_{a \text{ ном}}}{\Phi_6} \frac{10^{-6}}{1 - k_b} \left[\frac{l_p}{N_c} (\lambda_b + \lambda_{д.у}) + \lambda_{Rd} \right]; \quad (9.125)$$

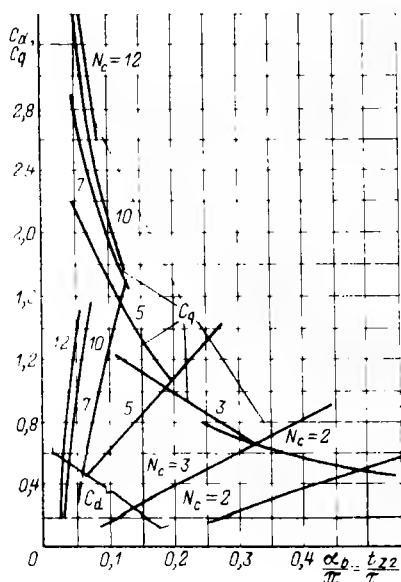
по поперечной оси

$$x_{kq*} = 7,9 \frac{F_{a \text{ ном}}}{\Phi_6} \frac{10^{-6}}{1 + k_b} \left[\frac{l_p}{N_c} (\lambda_b + \lambda_{д.у}) + \lambda_{Rq} \right]. \quad (9.126)$$

Здесь l_p — длина полюсного наконечника, м; $F_{a \text{ ном}}$ — МДС статора при номинальном токе; N_c — число стержней на полюс; λ_b — коэффициент проводимости пазового рассеяния. При круглых полуоткрытых пазах (см. рис. 9.20)

$$\lambda_b = \left(0,785 - \frac{b_s}{2d_s} \right) + \frac{h_s}{d_s};$$

$\lambda_{д.у}$ — коэффициент проводимости дифференциального рассеяния: $\lambda_{д.у} = t_{z2} / (12\delta' k_\delta)$; λ_{Rd} , λ_{Rq} — коэффициенты проводимости короткозамыкающих колец по продольной и поперечной осям: $\lambda_{Rd} = 0,19\tau C_d / N_c$; $\lambda_{Rq} = 0,19\tau C_q / N_c$; коэффициенты приведения C_d и C_q находят по рис. 9.37; k_b — коэффициент распределения демферной (пусковой) обмотки:



$$k_b = \frac{\sin N_c \alpha_b}{N_c \sin \alpha_b};$$

$$\alpha_b = \pi t_{z2} / \tau.$$

Значения k_b можно найти также по рис. 9.38.

Рис. 9.37. Коэффициенты приведения C_d и C_q для расчета проводимости короткозамыкающих колец

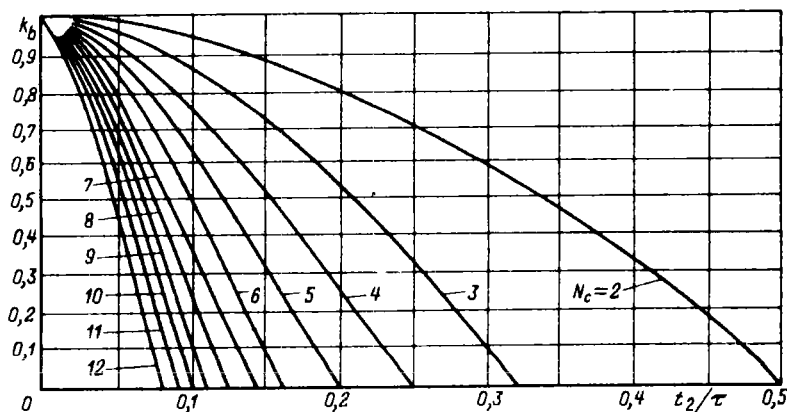


Рис. 9.38. Коэффициенты распределения для успокоительной (пусковой) обмотки

Формулы (9.125) и (9.126) получены для наиболее часто применяемого случая равномерного распределения стержней на полюсном наколичнике и полной (продольно-поперечной) демпферной (пусковой) обмотки.

При неполной обмотке (продольной) x_{kd*} определяют по (9.125), а

$$x_{kq*} \approx (3 - 4)x_{kd*}. \quad (9.127)$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности для двухслойных обмоток, Ом,

$$x_0 = \frac{2,18 I_1 F_{a \text{ ном}} \cdot 10^{-6}}{\Phi_6 q_1 k_y^2} \left[(\beta - 0,555) \frac{h_{п1}}{b_{п1}} + (3\beta - 2) \frac{h_4}{b_{п1}} \right] +$$

$$+ 0,355 \frac{F_{a \text{ ном}} (3\beta - 2)}{F_{\delta 0} k_y^2} \left[\left(\frac{1}{3q_1} \right)^2 + 0,39 \left(\beta - \frac{2}{3} \right) - \right.$$

$$\left. - \left(\beta - \frac{2}{3} \right)^2 + \frac{1}{27} \right], \quad (9.128)$$

где $\beta = y_1/3q_1$ — укорочение шага обмотки статора; k_y — коэффициент укорочения шага обмотки статора для первой гармоники — по (9.39); $h_{п1}$, $b_{п1}$ — высота и ширина паза статора; h_4 — высота верхней части паза, не занятой обмоткой; q_1 — число пазов на полюс и фазу обмотки статора.

При отсутствии демпферной (пусковой) клетки перед вторым членом коэффициент 0,355 необходимо заменить на 0,71.

Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси

$$x_{d*}' = x_{\sigma*} + \frac{x_{ad*} x_{\sigma f*}}{x_{ad*} + x_{\sigma f*}}; \quad (9.129)$$

по поперечной

$$x_{q*}' = x_{q*}. \quad (9.130)$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси

$$x_{d*}'' = x_{\sigma*} + \frac{x_{kd*} (x_{d*}' - x_{\sigma*})}{x_{kd*} + x_{d*}' - x_{\sigma*}}; \quad (9.131)$$

по поперечной оси

$$x_{q*}'' = x_{\sigma*} + \frac{x_{aq*} x_{kq*}}{x_{aq*} + x_{kq*}}. \quad (9.132)$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора обратной последовательности при работе машины на большое внешнее реактивное сопротивление

$$x_{2*} = (x_{d*}'' + x_{q*}'')/2; \quad (9.133)$$

при работе машины на малое внешнее сопротивление (короткое замыкание)

$$x_{2*} = \sqrt{x_{d*}'' x_{q*}''}. \quad (9.134)$$

Активное сопротивление обмотки возбуждения

$$r_{f*} = \frac{0,44 F_{a \text{ ном}} k_{ad}^2 l_{фср}}{10^8 \Phi_6 f w_f q_f}. \quad (9.135)$$

Активное сопротивление демпферной (пусковой) клетки при равномерном распределении стержней из однородного материала по продольной оси

$$r_{kd*} = \frac{2,16}{10^8 f} \frac{F_{a \text{ ном}}}{\Phi_6} \frac{1}{1 - k_B} \left[\frac{C_c l_c}{q_c N_c} - \frac{c_{к.з} T C_d}{q_{к.з} N_c} \right]; \quad (9.136)$$

по поперечной оси

$$r_{kq*} = \frac{2,16}{10^8 f} \frac{F_{a \text{ ном}}}{\Phi_B} \frac{1}{1 + k_B} \left[\frac{c_c l_c}{q_c N_c} - \frac{c_{к.з} \tau C_q}{q_{к.з} N_c} \right]; \quad (9.137)$$

где l_c — длина стержня, м, по (9.61); C_d и C_q — коэффициенты приведения (по рис. 9.37); c_c и $c_{к.з}$ — отношения удельных сопротивлений материала стержня и кольца к удельному сопротивлению меди (для меди эти коэффициенты равны 1, для латуни 4, для фосфористой бронзы 6,5).

При применении стержней из разнородного материала приближенно сопротивление демпферной (пусковой) обмотки можно найти по (9.136) и (9.137), заменив в них первый член в скобках выражением

$$\frac{c'_c c''_c l_c}{(c''_c N'_c + c'_c N''_c) q_c}, \quad (9.138)$$

где N'_c — число стержней на полюс с относительным удельным сопротивлением c'_c ; N''_c — число стержней на полюс с относительным удельным сопротивлением c''_c .

Постоянная времени представляет собой отношение индуктивности данной обмотки к ее сопротивлению. От постоянной времени зависит продолжительность протекания переходных процессов в синхронной машине.

Постоянная времени, с, обмотки возбуждения при разомкнутых обмотках статора и демпферной (пусковой)

$$T_{d0} = x_{f*} / (\omega r_{f*}), \quad (9.139)$$

где $\omega = 2\pi f$.

Постоянная времени, с, обмотки возбуждения при замкнутой обмотке статора, с,

$$T'_d = T_{d0} \frac{x_{d*}^1}{x_{d*}}. \quad (9.140)$$

Постоянные времени демпферной (пусковой) обмотки, с, при разомкнутых обмотках статора и возбуждения:

по продольной оси

$$T_{kd0} = (x_{ad*} + x_{kd*}) / (\omega r_{kd*}); \quad (9.141)$$

по поперечной оси

$$T_{kq0} = (x_{aq*} + x_{kq*}) / (\omega r_{kq*}). \quad (9.142)$$

Постоянные времени демпферной (пусковой) обмотки по продольной оси, с, при замкнутой накоротко обмотке возбуждения и разомкнутой обмотке статора

$$T''_{kdf} = \frac{x_{kd*} x_{\sigma f*} + x_{ad*} x_{kd*} + x_{\sigma f*} x_{ad*}}{\omega r_{kd*} (x_{\sigma f*} + x_{ad*})}. \quad (9.143)$$

Постоянная времени демпферной (пусковой) обмотки по продольной оси, с, при замкнутых накоротко обмотке возбуждения и обмотке статора

$$T''_{kd} = T''_{kdf} \frac{x''_{d*}}{x'_{d*}}. \quad (9.144)$$

Постоянная времени демпферной (пусковой) обмотки по поперечной оси полюсов, с, при замкнутой накоротко обмотке статора

$$T''_{kq} = \frac{x''_{q*}}{x_{q*}} T_{kq0}. \quad (9.145)$$

Таблица 9.13. Параметры явиополусных синхронных генераторов и двигателей в относительных единицах

Схема	$x_{\sigma*}$	r_{1*}	x_{d*}	x_{q*}
С демпферной (пусковой) обмоткой	0,1–0,2	0,008–0,02	1–2,4	0,6–1,6
Без демпферной (пусковой) обмотки	0,1–0,2	0,08–0,02	1–2,4	0,6–1,6

Схема	x'_{d*}	x''_{d*}	x''_{q*}	x_{2*}	x_{0*}
С демпферной (пусковой) обмоткой	0,2–0,6	0,15–0,3	0,15–0,4	0,15–0,35	0,02–0,2
Без демпферной (пусковой) обмотки	0,2–0,6	—	—	0,3–0,8	0,04–0,25

Таблица 9.14. Постоянные времени явнополюсных синхронных генераторов и двигателей

Схема	T_{d0} , с	T_d' , с	T_{kd}'' , с	T_a , с
С демпферной (пусковой) обмоткой	2–10	0,8–2,5	0,01–0,08	0,03–0,35
Без демпферной (пусковой) обмотки	2–10	0,8–2,5	–	0,1–0,5

Постоянная времени обмотки статора, с, при короткозамкнутых обмотках ротора

$$T_a = x_{2*} / (\omega r_{1*}). \quad (9.146)$$

Пределы изменения параметров и постоянных времени для синхронных машин общего назначения даны в табл. 9.13 и 9.14.

9.17. МАССА АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для оценки массогабаритных параметров спроектированной машины, для расчета потерь и т. п. возникает необходимость в определении массы активных материалов. В дальнейшем, после разработки конструкции, может быть определена масса конструкционных материалов, а затем и масса всей машины.

При определении массы активных материалов необходимые для расчета размеры берут (в метрах) из параграфов, указанных в скобках, или из соответствующих формул.

Масса зубцов статора, кг,

$$m_{Z1} = 7800 l_{ст1} k_c h_{п1} b_{Z1/2} Z_1, \quad (9.147)$$

где

$$b_{Z1/2} = \frac{\pi(D + h_{п1})}{Z_1} - b_{п1},$$

$l_{ст1}$ — по (9.10); $h_{п1}$ — по (9.28); $b_{п1}$ — по (9.27) или по эскизу паза.

Масса ярма магнитопровода статора, кг,

$$m_{a1} = 7800 l_{ст1} k_c \pi (D_a - h_a) h_a, \quad (9.148)$$

где h_a — по (9.32).

Масса меди обмотки статора, кг,

$$m_{м1} = 8900 q_{эф} u_n Z_1 l_{ср1} / 2, \quad (9.149)$$

где $q_{эф}$ — по (9.29); u_n — по (9.15) или (9.19); $l_{ср1}$ — см. в § 9.13.

Масса меди обмотки возбуждения, кг (см. § 9.15),

$$m_{mf} = 8900 q_f l_{фср} 2 p w_f. \quad (9.150)$$

Масса меди стержней демпферной (пусковой) обмотки, кг (см. § 9.10),

$$m_{м.с} = 8900 q_c \cdot 2 p N_c l_c. \quad (9.151)$$

Масса меди короткозамыкающих колец, кг (см. § 9.10),

$$m_{м.к.з} = 8900 q_{к.з} (D - 2\delta - 2h_s - 2d_s) 2\pi. \quad (9.152)$$

Масса стали полюсов, кг (см. § 9.9),

$$m_m = 7800 l'_m k_{ср} \cdot 2p (h_m l_m + 0,8 h_p b_p). \quad (9.153)$$

Масса стали обода ротора, кг (см. § 9.9),

$$m_j = 7800 l_j \pi (D - 2\delta - 2h_{mp} - h_j) h_j, \quad (9.154)$$

где h_{mp} — по (9.79); для h_j берутся уточненные значения, полученные из механического расчета.

По этим данным можно найти общие затраты меди и активной стали в машине.

Полная масса меди

$$m_{м} = m_{м1} + m_{mf} + m_{м.с} + m_{м.к.з}. \quad (9.155)$$

Полная масса активной стали

$$m_{ст} = m_{Z1} + m_{a1} + m_m + m_j. \quad (9.156)$$

Разделив (9.155) и (9.156) на полную номинальную мощность $S_{ном}$, находят массу активных материалов на единицу мощности:

$$q_{м} = m_{м} / S_{ном}; \quad (9.157)$$

$$q_{ст} = m_{ст} / S_{ном}. \quad (9.158)$$

9.18. ПОТЕРИ И КПД

Потери в синхронной машине можно разделить на основные и добавочные. Ниже приводится расчет этих потерь для номинального режима работы.

Основные потери. Основные электрические потери в обмотке статора, кВт,

$$P_{\Sigma 1} = m I_{\text{ном.ф}}^2 r_1 \cdot 10^{-3}. \quad (9.159)$$

Потери на возбуждение, кВт, при наличии возбуждателя, сочлененного с валом машины, согласно ГОСТ 11828-86 определяют с учетом потерь в возбuditеле:

$$P_f = \frac{I_{f\text{ном}}^2 r_f + 2 \Delta U_{\text{щ}} I_{f\text{ном}}}{\eta_f} \cdot 10^{-3}. \quad (9.160)$$

Для машин, возбуждаемых от отдельно установленных устройств,

$$P_f = (I_{f\text{ном}}^2 r_f + 2 \Delta U_{\text{щ}} I_{f\text{ном}}) \cdot 10^{-3}, \quad (9.161)$$

где $I_{\text{ном.ф}}$, $I_{f\text{ном}}$ — номинальные значения тока якоря и тока возбуждения; $\Delta U_{\text{щ}}$ — переходное падение напряжения в щеточном контакте ($\Delta U_{\text{щ}} = 1$ В); η_f — КПД возбуждателя ($\eta_f = 0,8 \div 0,85$).

Сопротивления обмоток r_1 и r_f определяют по (9.95) и (9.120) соответственно и приводят к расчетной температуре, равной 75°C для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости А, Е, В или 115°C для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости F и H.

Магнитные потери в ярме магнитопровода статора, кВт,

$$P_{a1} = k_{\text{да}} p_{a1/50} B_a^2 (f/50)^{1,3} m_{a1} \cdot 10^{-3}. \quad (9.162)$$

Магнитные потери в зубцах магнитопровода статора, кВт,

$$P_{Z1} = k_{\text{дз}} p_{Z1/50} B_Z^2 (f/50)^{1,3} m_{Z1}, \quad (9.163)$$

где $p_{a1/50}$ и $p_{Z1/50}$ — удельные потери при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц, которые следует взять из табл. П1.17 для соответствующей марки стали; $k_{\text{да}}$ и $k_{\text{дз}}$ — коэффициенты, учитывающие увеличение потерь из-за частичного замыкания листов вследствие наличия заусенцев, а также изменения структуры стали при штамповке: при $P_{\text{ном}} \leq 100$ кВт $k_{\text{да}} = 1,5$; $k_{\text{дз}} = 2$; при $P_{\text{ном}} > 100$ кВт $k_{\text{да}} = 1,3$; $k_{\text{дз}} = 1,7$. B_a и $B_{Z1/3}$ — индукция в ярме статора и зубце статора на $1/3$ высоты зубца при $E = U_{\text{ном.ф}}$ ($E_* = 1$, см. расчет характеристики холостого хода).

Механические потери, равные сумме потерь в подшипниках и на вентиляцию, кВт,

$$P_{\text{мех}} \approx 3,68 p (v_p/40)^3 \sqrt{l_1}, \quad (9.164)$$

где v_p — окружная скорость ротора, м/с; l_1 — полная длина статора, м.

Добавочные потери. Добавочные потери возникают в машине как при холостом ходе, так и при нагрузке. При холостом ходе возникают потери на поверхности полюсных наконечников, кВт, из-за колебания индукции вследствие зубчатого строения статора:

$$P_{\text{пов}} = 0,5 \cdot 2 \pi a l_1 k_0 \left(\frac{Z_1 n}{10\,000} \right)^{1,5} (B_0 t_{Z_1} \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-3}, \quad (9.165)$$

где $B_0 = B_{\delta 0} (k_{\delta 1} - 1)$; $B_{\delta 0}$ — индукция при $E = U_{\text{ном.ф}}$, Тл; $k_{\delta 1}$ — коэффициент воздушного зазора; k_0 — коэффициент: $k_0 = 4,6$ при полюсах из листов толщиной 1 мм и $k_0 = 8,6$ при полюсах из листов толщиной 2 мм, при массивных полюсных наконечниках $k_0 = 23,3$; α — коэффициент полюсного перекрытия; Z_1 — число зубцов статора (l_1 , τ и t_1 подставляются в метрах).

Добавочные потери при нагрузке $P_{\text{доб}}$ появляются в обмотках статора из-за вихревых токов и в стали как в статоре, так и в полюсных наконечниках ротора от высших гармонических магнитного поля якоря.

Приближенно полные добавочные потери при нагрузке можно определить в процентах полезной мощности для генераторов и подводимой мощности для двигателей:

Для машин до 1000 кВт · А 0,5

Для машин более 1000 кВт · А 0,25–0,4

Общие потери при номинальной нагрузке

$$\Sigma P = P_{\Sigma 1} + P_f + P_{a1} + P_{Z1} + P_{\text{мех}} + P_{\text{пов}} + P_{\text{доб}}. \quad (9.166)$$

Коэффициент полезного действия генератора

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_{\text{ном}} + \Sigma P}, \quad (9.167)$$

двигателя

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_{\text{ном}}}, \quad (9.168)$$

где $P_{\text{ном}} = m U_{\text{ном.ф}} I_{\text{ном.ф}} \cos \varphi$ — номинальная активная мощность

генератора, кВт; $P_{1\text{ном}}$ — активная мощность, подводимая к двигателю при номинальной нагрузке, кВт: $P_{1\text{ном}} = m U_{\text{ном.ф}} I_{\text{ном.ф}} \cos \varphi$.

9.19. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА ДЛЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ

Для оценки теплового состояния обмотки статора можно воспользоваться методикой упрощенного расчета, применяемого в заводской практике для нормальных синхронных машин защищенного исполнения. Эта методика базируется на следующих допущениях. Принимается, что все потери, выделяемые в пределах активной длины статора, отводятся с его цилиндрической охлаждаемой поверхности, а потери в лобовых частях обмотки — с охлаждаемой поверхности этих частей.

При этих допущениях определяется отдельно превышение температуры части обмотки, находящейся в пределах активной длины стали и превышение температуры лобовых частей по длине этой части.

Среднее превышение температуры всей обмотки находят как среднеарифметическое значение превышений, отнесенное к 1 м длины полувитка обмотки. Ниже приводятся расчетные формулы.

1. Перепад температуры в изоляции обмотки статора определяется по (9.33).

2. Удельный тепловой поток q_c на единицу цилиндрической внутренней поверхности статора, Вт/м²,

$$q_c = \frac{\left(P_{\Sigma 1} \frac{l_1}{l_{\text{ср } 1/2}} + P_{\text{доб}} + P_{a1} + P_{Z1} \right) \cdot 10^3}{\pi D l_1}, \quad (9.169)$$

где P_{a1} и P_{Z1} — потери в стали спинки и зубцов статора при холостом ходе, Вт; D и l_1 — внутренний диаметр и длина статора, м; $l_{\text{ср } 1/2}$ — средняя длина полувитка обмотки статора, м.

Искомое превышение температуры охлаждаемой поверхности статора относительно температуры окружающего воздуха находят так:

$$\Delta \vartheta_{\text{пов.с}} = q_c / [\alpha (1 + 0,1 v_p)], \quad (9.170)$$

где значения коэффициента теплоотдачи α в зависимости от отношения длины статора l_1 к полюсному делению τ могут быть приняты равными:

$$\alpha = 80 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2) \text{ при } l_1/\tau \leq 2;$$

$$\alpha = 66 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2) \text{ при } 2 < l_1/\tau \leq 4;$$

$$\alpha = 57 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2) \text{ при } 4 < l_1/\tau \leq 5;$$

v_p — окружная скорость ротора, м/с.

3. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха. Так как лобовые части обмотки статора обычно образуют своеобразную решетку, продуваемую воздухом, то они охлаждаются почти по всему периметру поперечного сечения каждой якорной секции. Соответственно этому плотность теплового потока на единицу охлаждаемой поверхности лобовых частей, Вт/м², равна:

$$q_{\text{л}} = \rho_{\vartheta} A J_1 t_1 / \Pi_1, \quad (9.171)$$

где t_{Z1} – зубцовое деление статора, м; Π_1 – периметр поперечного сечения паза статора, м; A – линейная нагрузка, А/м; J_1 – плотность тока в статоре, А/м²; ρ_{ϑ} – удельное сопротивление при температуре ϑ .

Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей статора, °С,

$$\Delta \vartheta_{\text{л}} = q_{\text{л}} / 13,3 (1 + 0,07 \nu_p), \quad (9.172)$$

где ν_p – окружная скорость ротора при радиальной вентиляции или вентилятора при аксиальной вентиляции, м/с.

4. Превышение температуры обмотки статора. Среднее значение превышения температуры обмотки статора, °С,

$$\Delta \vartheta_{\text{об.с}} = \frac{(\Delta \vartheta_{\text{из}} + \Delta \vartheta_{\text{пов.с}}) l_1 + (\Delta \vartheta_{\text{из}} + \Delta \vartheta_{\text{л}}) l_{\text{л}}}{l_1 + l_{\text{л}}}, \quad (9.173)$$

где l_1 – полная длина статора, м; $l_{\text{л}} = (l_{\text{ср}1/2} - l_1)$ – длина лобовой части обмотки статора, м.

9.20. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ МАШИН

а) Основные характеристики

Рабочие свойства машины определяются ее характеристиками. Для генераторов основными характеристиками являются внешняя, регулировочная, U-образная и угловая, для двигателей – рабочие, U-образная и угловая. Для построения всех указанных характеристик используют векторные диаграммы.

Регулировочная характеристика генератора представляет собой зависимость $I_{f*} = f(I_*)$ при $U_* = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$ (рис. 9.39). Для построения этой характеристики задают ряд значений тока якоря I_* в пределах от 0 до 1 и при одних и тех же значениях U_* и $\cos \varphi$ строят векторные диаграммы, из которых находят ток возбуждения. Ток возбуждения при $I_* = 0$ определяют из характеристики холостого хода по заданному напряжению. Для регулировочной характеристики при $U_* =$

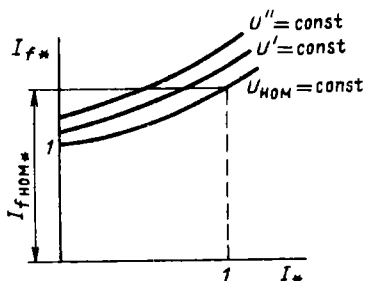


Рис. 9.39. Регулировочные характеристики

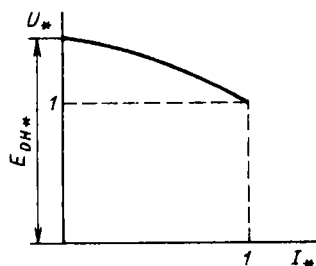


Рис. 9.40. Внешняя характеристика

$= 1 = \text{const}$ и $\cos \varphi = \cos \varphi_{\text{ном}} = \text{const}$ ток возбуждения, соответствующий номинальному току якоря, можно определить по векторной диаграмме, построенной раньше для нахождения МДС обмотки возбуждения (см. § 9.14). Эта МДС в относительных единицах равна току возбуждения $I_{f\text{ном}*}$.

Внешняя характеристика $U_* = f(I_*)$ при $I_{f\text{ном}*} = \text{const}$ и $\cos \varphi_{\text{ном}} = \text{const}$ (рис. 9.40) определяет зависимость напряжения генератора от его нагрузки. Исходная точка этой характеристики имеет координаты $U_* = 1$ и $I_* = 1$. При токе $I_* = 0$ напряжение $U_* = E_{0H*}$ берут из векторной диаграммы, построенной для номинального режима машины. Промежуточные точки характеристики можно найти, построив ряд регулировочных характеристик при различных значениях напряжения U_ϕ . Напряжения U_* , при которых строят регулировочные характеристики, берут в пределах от E_{0*} до 1, а $\cos \varphi = \cos \varphi_{\text{ном}}$. Точки пересечения регулировочных характеристик с прямой, проведенной параллельно оси абсцисс, при $I_{f*} = I_{f\text{ном}}$ дают искомые точки внешней характеристики.

U-образные характеристики $I_* = f(I_{f*})$ при $P_1 = mU_\phi I_\phi \cos \varphi = \text{const}$ (рис. 9.41) можно получить путем построения ряда векторных диаграмм при $U = 1 = \text{const}$ и $I_* \cos \varphi = \text{const}$ (рис. 9.42). Из построенных векторных диаграмм для каждого значения тока I_* определяют ток возбуждения I_{f*} .

Угловые характеристики дают зависимость активной мощности от θ (угла нагрузки): $P_1 \approx P = f(\theta)$ при $U_* = 1$ и $E_{0*} = \text{const}$. Угол θ является углом между осями полюсов и результирующего магнитного поля или между векторами ЭДС E_{0H*} и напряжения U_* . Построение угловых характеристик с учетом насыщения машины связано с большими трудностями. Ниже приводится расчет этой характеристики без учета насыщения. Параметры в этом случае принимают постоянными, равными их значению для ненасыщенной машины, а $r_1 = 0$.

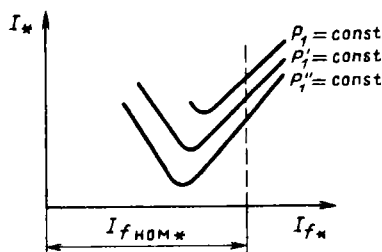


Рис. 9.41. U-образные характеристики

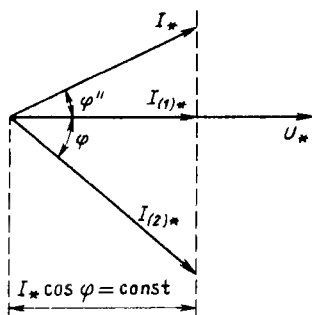


Рис. 9.42. К построению U-образных характеристик

Характеристику при $U_* = 1$ в относительных единицах строят по уравнению

$$P_{1*} = \frac{E'_{0*}}{x_{d*}} \sin \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \sin 2\theta. \quad (9.174)$$

Электродвижущую силу E'_{0*} определяют по продолжению прямой части характеристики холостого хода при токе возбуждения $I_{fном*}$. При построении характеристики $P_* = f(\theta)$ угол θ изменяется от 0 до π .

По угловой характеристике определяют статическую перегружаемость машины, равную отношению $P_{max}/P_{ном}$. Номинальная мощность $P_{ном}$ в относительных единицах равна $\cos \varphi_{ном}$. Если пренебречь активным сопротивлением (что возможно для машин средней и большой мощности), то можно принять

$$P_{max}/P_{ном} = M_{max}/M_{ном}, \quad (9.175)$$

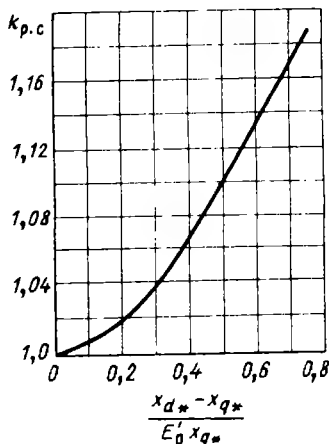
где M_{max} и $M_{ном}$ — максимальный и номинальный моменты.

Статическую перегружаемость можно также рассчитать по формуле

$$\frac{P_{max}}{P_{ном}} = \frac{M_{max}}{M_{ном}} = \frac{E'_{0*}}{x_{d*} \cos \varphi_{ном}} k_{p.c.} \quad (9.176)$$

Коэффициент $k_{p.c}$ учитывает реактивные составляющие мощности и момента, обусловленные неодинаковыми индуктивными сопротивлениями x_d и x_q . Он принимается по рис. 9.43 в зависимости от отношения $(x_{d*} - x_{q*})/(E'_{0*} x_{q*})$.

Рис. 9.43. К определению коэффициента $k_{p.c}$



Как уже отмечалось ранее, статическая перегружаемость синхронных двигателей общего назначения должна быть не ниже 1,65.

Для синхронных двигателей U-образные и угловые характеристики строят так же, как и для генераторов, с использованием соответствующих векторных диаграмм.

Рабочие характеристики двигателей, т. е. зависимости P_{1*} , I_{1*} , $\cos \varphi$, η , $M_* = f(P_{2*})$, при $U_* = 1 = \text{const}$ и $I_{f\text{ном}*} = \text{const}$ могут быть получены по U-образным характеристикам. Для этого необходимо построить несколько U-образных характеристик при различных значениях $P_{1*} = \text{const}$ и $U_* = 1 = \text{const}$. По этим характеристикам при $I_{f*} = I_{f\text{ном}}$ находят ток I при данном значении мощности P_{1*} и $\cos \varphi = P_1 / (m U_{\text{ном.ф}} I)$. Затем определяют мощность на валу: $P_2 = P_1 - \Sigma P$ (ΣP — потери в машине для данного режима работы), $\eta = P_2 / P_1$, $M = P_2 / \Omega_1$ ($\Omega_1 = 2\pi n_{\text{ном}} / 60$).

6) Токи короткого замыкания

При расчете механических усилий, действующих на лобовые части обмотки статора и на их бандажи, исходят из наибольшего мгновенного значения тока трехфазного короткого замыкания на выводах машины при данном значении возбуждения. Этот ток называется ударным током короткого замыкания.

Согласно ГОСТ 183-74 синхронная машина должна выдерживать ударный ток короткого замыкания при напряжении холостого хода, равном 105% номинального:

$$I_{уд*} = \frac{I_{уд}}{\sqrt{2} I_{\text{ном.ф}}} = 1,8 \frac{1,05}{x_{d*}} \quad (9.177)$$

Коэффициент 1,8 учитывает затухание аperiodической составляющей тока короткого замыкания.

Для машин без демпферной обмотки в (9.177) вместо x_{d*}'' следует подставить x_{d*}' .

Практический интерес представляют кратности установившихся токов короткого замыкания. Под этим понимают отношение установившегося тока короткого замыкания к номинальному току обмотки якоря.

Кратность при возбуждении холостого хода, т. е. при возбуждении, которое при номинальной частоте вращения и разомкнутой обмотке якоря дает на выводах машины номинальное напряжение, обозначают ОКЗ (отношение короткого замыкания):

$$\text{ОКЗ} = I_{к0*} = E_{0н*}' / x_{d*}, \quad (9.178)$$

где $E_{0н*}'$ — ЭДС, определяемая по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода при $I_{f*} = 1$.

Кратность при номинальном токе возбуждения

$$I_{к.н*} = E_{0*}' / x_d. \quad (9.179)$$

в) Пусковые характеристики

Основным методом пуска синхронных двигателей в настоящее время является асинхронный пуск. Для этого в полюсах ротора размещается пусковая обмотка по типу короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя.

Оценку пусковых свойств двигателя производят по пусковым характеристикам, т. е. по зависимостям тока в статоре и момента от скольжения I_* , $M_* = f(s)$. Наибольший интерес на этих характеристиках представляют величины, соответствующие $s = 1$: начальный пусковой ток $I_{п*}$ и начальный пусковой момент $M_{п*}$, а также момент при скольжении $s = 0,05$ — входной момент в синхронизм $M_{вх}$.

При расчете пусковых характеристик необходимо учитывать, что в отличие от ротора обычного асинхронного двигателя ротор синхронного явнополюсного двигателя имеет магнитную и электрическую несимметрию. Если условно подразделить пусковую обмотку на две части, то можно принять, что по продольной оси машины на роторе располагаются две обмотки, одной из которых является обмотка возбуждения, а другой — часть пусковой обмотки, представляющая ее эффект по продольной оси. По поперечной оси на роторе имеется только пусковая обмотка, представляющая ее эффект по поперечной оси. Необходимо также учитывать, что обмотка статора по продольной и поперечной осям имеет неодинаковые индуктивные сопротивления ($x_d \neq x_q$).

На основании сказанного полное сопротивление по продольной оси машины, которое зависит от скольжения s , будет равно:

$$\underline{Z}_{ds} = jx_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{jx_{ad}} + \frac{1}{\frac{r'_f}{s} + jx_{\sigma f}} + \frac{1}{\frac{r_{kd}}{s} + jx_{kd}}}}, \quad (9.180)$$

где $r'_f \approx (10 \div 12) r_f$ [r_f — по (9.135)].

Полное сопротивление по поперечной оси

$$\underline{Z}_{qs} = jx_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{jx_{aq}} + \frac{1}{\frac{r_{kq}}{s} + jx_{kq}}}}. \quad (9.181)$$

В приведенных формулах значения всех параметров принимают в относительных единицах (здесь и далее звездочка в обозначениях величин в относительных единицах опускается).

Вследствие магнитной и электрической несимметрий машины в статоре кроме тока I' основной частоты f_1 протекают токи I'' частоты $2s - 1$. Значения их могут быть найдены по следующим формулам:

ток якоря частоты f_1

$$\underline{I}'_1 = \frac{\underline{U} \left(\underline{Z}_{ds} + \underline{Z}_{qs} + \frac{2r_1}{2s - 1} \right)}{(\underline{Z}_{ds} + r_1) \left(\underline{Z}_{qs} + \frac{r_1}{2s - 1} \right) + (\underline{Z}_{qs} + r_1) \left(\underline{Z}_{ds} + \frac{r_1}{2s - 1} \right)}; \quad (9.182)$$

ток якоря частоты $2s - 1$

$$\underline{I}''_1 = \frac{\underline{U} (\underline{Z}_{qs} - \underline{Z}_{ds})}{(\underline{Z}_{ds} + r_1) \left(\underline{Z}_{qs} + \frac{r_1}{2s - 1} \right) + (\underline{Z}_{qs} + r_1) \left(\underline{Z}_{ds} + \frac{r_1}{2s - 1} \right)}; \quad (9.183)$$

действующее значение тока статора

$$I_1 = \sqrt{I_1'^2 + I_1''^2}; \quad (9.184)$$

момент вращения

$$M = \left(\underline{U} I'_{1a} - I_1'^2 r_1 + I_1''^2 \frac{r_1}{2s - 1} \right) \frac{1}{\cos \varphi_{\text{ном}}}, \quad (9.185)$$

где I'_{1a} — активная составляющая тока I'_1 .

Последний член выражения в скобках соответствует моменту, создаваемому током I_1'' . При скольжениях $s > 0,5$ этот момент положительный, а при $s < 0,5$ — отрицательный, в результате чего в кривой $M = f(s)$ могут наблюдаться провалы. Из-за наличия провалов в кривой момента при разгоне двигатель может застрять на промежуточной скорости и не войти в синхронизм. Обычно для уменьшения провала в кривой момента обмотку ротора замыкают на добавочный резистор с сопротивлением, примерно в 10 раз большим сопротивления самой обмотки.

В этом случае при определении $\underline{Z}_{ds}$ и $\underline{Z}_{qs}$ как уже указывалось, сопротивление r'_f принимается равным $(10 - 12)r_f$.

Расчет по приведенным формулам связан с большой вычислительной работой. Его можно упростить, если у машин средней и большой мощности пренебречь активным сопротивлением r_1 . Тогда получим

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}'_1 &= \frac{\underline{U}(\underline{Z}_{qs} + \underline{Z}_{ds})}{2\underline{Z}_{qs}\underline{Z}_{ds}}; \\ \underline{I}''_1 &= \frac{\underline{U}(\underline{Z}_{qs} - \underline{Z}_{ds})}{2\underline{Z}_{qs}\underline{Z}_{ds}}; \end{aligned} \right\} \quad (9.186)$$

$$M = \underline{U} I'_{1a} \frac{1}{\cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (9.187)$$

Погрешность такого расчета по сравнению с расчетом по (9.177) — (9.180) не превышает 4%.

Для построения пусковых характеристик задают ряд значений скольжения s в пределах от 1 до 0,05 и для каждого его значения определяют I_1 и M . Иногда можно ограничиться расчетом начального пускового и входного моментов и начального пускового тока.

У серийных двигателей, выпускаемых в настоящее время промышленностью, эти значения лежат в следующих пределах: $M_{\text{п}} = 0,8 \div 1,3$; $M_{\text{вх}} = 0,9 \div 1,9$; $I_{\text{п}} = 4,5 \div 6,5$.

Пример расчета трехфазного синхронного двигателя

Проектное задание:

1. Номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 500$ кВт.
2. Номинальное напряжение (линейное) $U_{\text{ном}} = 6000$ В.

3. Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 500$ об/мин.

4. Частота $f = 50$ Гц.

5. $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$ (опережающий).

6. Кратность максимального момента $M_{\text{max}*} = 2,2$.

Режим работы – продолжительный. Конструкция – защищенная (IP11) с горизонтальным валом.

Номинальные величины

1. Номинальное фазное напряжение (предполагается, что обмотка статора будет соединена в звезду)

$$U_{\text{ном.ф}} = U_{\text{ном}} / \sqrt{3} = 6000/3 = 3468 \text{ В.}$$

2. Номинальная полная мощность

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{500 \cdot 10^3}{0,937 \cdot 0,9} = 593 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{А}$$

(по табл. 9.3, исходя из номинальных данных машины, определяем $\eta_{\text{ном}} = 0,937$).

3. Номинальный фазный ток

$$I_{\text{ном.ф}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}} = \frac{593 \cdot 10^3}{3 \cdot 6000} = 57,1 \text{ А.}$$

4. Число пар полюсов

$$p = 60f/n_{\text{ном}} = 60 \cdot 50/500 = 6.$$

5. Расчетная мощность

$$S' = k_F S_{\text{ном}} = 1,05 \cdot 593 \cdot 10^3 = 623 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Размеры статора

6. По рис. 9.8 для $S' = 623$ кВ · А при $p = 6$ предварительно находим внутренний диаметр статора $D = 0,9$ м.

7. Внешний диаметр статора по (9.3)

$$D_a = K_D D = (1,28 \div 1,33) 0,9 = 1,15 \div 1,2 \text{ м.}$$

По табл. 9.7 ближайший нормализованный внешний диаметр статора $D_a = 1,18$ м (16-й габарит). Высота оси вращения $h = 0,63$ м.

Поскольку найденный диаметр D_a лежит в пределах, задаваемых коэффициентом K_D , то пересчет диаметра не производим.

8. Полюсное деление по (9.4)

$$\pi = \pi D / (2p) = 3,14 \cdot 0,9/12 = 0,236 \text{ м.}$$

9. Расчетная длина статора. По рис. 9.9 для $\tau = 0,236$ м при $p = 6$ находим $A = 440 \cdot 10^2$ А/м, $B_{\delta \text{ ном}} = 0,89$ Тл. Задаемся: $a_{\delta} = 0,66$; $k_B = 1,15$; $a_{\delta} k_B = 0,76$; $k_{\text{об1}} = 0,92$. По (9.5) определяем расчетную длину статора:

$$l_{\delta} = \frac{6,1 S'}{a_{\delta} k_B k_{\text{об1}} A B_{\delta \text{ ном}} D^2 n_{\text{ном}}} =$$

$$= \frac{6,1 \cdot 623 \cdot 10^3}{0,76 \cdot 0,92 \cdot 44\,000 \cdot 0,89 \cdot 0,9^2 \cdot 500} = 0,342 \text{ м.}$$

10. Находим λ по (9.6):

$$\lambda = l_{\delta} / \tau = 0,342 / 0,236 = 1,45.$$

По рис. 9.11 устанавливаем, что найденное значение λ при $p = 6$ лежит в пределах, ограниченных кривыми.

11. Действительная длина статора (по 9.7)

$$l_1 = 1,05 l_{\delta} = 1,05 \cdot 0,342 = 0,36 \text{ м.}$$

12. Число вентиляционных каналов по (9.8) при $b_K = 0,01 \text{ м}$

$$n_K = \frac{l_1 - l_{\text{пак}}}{l_{\text{пак}} + b_K} = \frac{0,36 - (0,04 - 0,05)}{(0,04 - 0,05) + 0,01} = 6,4 \approx 5,17.$$

Принимаем $n_K = 6$.

13. Длина пакета по (9.9)

$$l_{\text{пак}} = \frac{l_1 - n_K b_K}{n_K + 1} = \frac{0,36 - 6 \cdot 0,01}{6 + 1} = 0,043 \text{ м.}$$

14. Суммарная длина пакетов магнитопровода по (9.10)

$$l_{\text{ст1}} = l_{\text{пак}} (n_K + 1) = 0,043 (6 + 1) = 0,301 \text{ м.}$$

Зубцовая зона статора. Сегментировка

15. Число параллельных ветвей обмотки статора.

Так как $I_{\text{ном.ф}} = 57,1 < 200 \text{ А}$, то выбираем $a = 1$.

16. Из рис. 9.13 (кривые 2) для $\tau = 0,236 \text{ м}$ находим $t_{Z1\min} = 0,031 \text{ м}$;
 $t_{Z1\max} = 0,035 \text{ м}$.

17. Максимальное число пазов (зубцов) магнитопровода статора

$$Z_{1\max} = \pi D / t_{Z1\min} = \pi \cdot 0,9 / 0,031 \approx 91.$$

18. Минимальное число пазов (зубцов) магнитопровода статора

$$Z_{1\max} = \pi D / t_{Z1\max} = \pi \cdot 0,9 / 0,035 \approx 81.$$

19. Число пазов магнитопровода статора.

Так как $D_a > 990 \text{ мм}$, то магнитопровод статора выполняется сегментированным. В диапазоне пазов $Z_{1\max} \div Z_{1\min}$ требованиям п. 1-4 § 9.6 удовлетворяют числа пазов $Z_1 = 81$

$$\left(q_1 = \frac{Z_1}{2p\tau} = \frac{81}{2 \cdot 6 \cdot 3} = 2 \frac{1}{4}; \quad t_{Z1} = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 0,9}{81} = 0,035 \text{ м} \right)$$

и

$$Z_1 = 90 \quad (q_1 = 2 \frac{1}{2}; \quad t_{Z1} = 0,0314 \text{ м}).$$

20. Расчет числа проводников в пазу u_{Π} по (9.15), числа сегментов $s_{\text{СТ}}$ и хорды H по (9.20), а также уточненной линейной нагрузки A по (9.16) сводим в табл. 9.15.

Наилучший результат дает вариант 3, который и принимаем для дальнейших расчетов.

$Z_1 = 90$; $s_{\text{СТ}} = 6$; $H = 0,59$ м (сегменты штампуются из листов 600×1500 мм); $u_{\Pi} = 24$; $q_1 = 2^{1/2}$; $t_{Z_1} = 0,0314$ м; $A = 440 \cdot 10^2$ А/м.

Пазы и обмотка статора

21. Ширина паза (предварительно) по (9.21)

$$b_{\Pi 1} = 0,39 t_{Z_1} = 0,39 \cdot 0,0314 = 0,012 \text{ м (12 мм)}.$$

22. Поперечное сечение эффективного проводника обмотки статора (предварительно) по (9.22)

$$q_{\text{ЭФ}} = \frac{I_{\text{ном.ф}}}{a J_1} = \frac{57 \cdot 1}{1 \cdot 4,9 \cdot 10^6} = 11,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 (11,7 \text{ мм}^2),$$

где

$$J_1 = A J_1 / A = 2150 \cdot 10^6 / 440 \cdot 10^2 = 4,9 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

($A J_1$ — по рис. 9.16, кривая 2).

23. Возможная ширина изолированного проводника по (9.25)

$$b'_{1\text{из}} = b_{\Pi 1} - \delta_{\text{из.п}} = 12 - 4,7 = 7,3 \text{ мм}.$$

Изоляция катушек выбрана для класса нагревостойкости В по табл. 3.5. Двусторонняя толщина изоляции $\delta_{\text{из.п}} = 4,7$ мм.

24. Размеры проводников обмотки статора. Принимаем, что эффективный проводник состоит из одного элементарного ($q_{\text{ЭФ}} = 11,7 < 18 \text{ мм}^2$). Марка провода ПЭТВСД с толщиной двусторонней изоляции 0,5 мм. Ширина голого прямоугольного проводника (предварительная) $7,3 - 0,5 = 6,8$ мм.

По табл. ПЗ.3 размеры медного проводника равны $a_1 \times b_1 = 1,8 \cdot 7,1$ мм (с изоляцией $a_{1\text{из}} \times b_{1\text{из}} = 2,3 \cdot 7,6$ мм), $q_{\text{ЭФ}} = 12,42 \text{ мм} (12,42 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2)$.

25. Ширина паза (уточненная) по (9.27)

$$b_{\Pi 1} = n_{\text{ш}} b_{1\text{из}} + \delta_{\text{из.п}} + \delta_{\text{р.щ}} + \delta_{\text{ш}} = 1 \cdot 7,6 + 4,7 + 0,05 + 0,2 = 12,5 \text{ мм}.$$

26. Высота паза по (9.28)

$$\begin{aligned} h_{\Pi 1} &= u_{\Pi} n_{\text{в}} a_{1\text{из}} + \Sigma \delta_{\text{из}} + h_{\text{К}} + \delta_{\text{р.в}} + \delta_{\text{в}} = \\ &= 24 \cdot 1 \cdot 2,3 + 12,4 + 5 + 1,2 + 0,2 \approx 74 \text{ мм}, \end{aligned}$$

где

$$\delta_{\text{р.в}} = 0,5 n_{\text{в}} u_{\Pi} = 0,05 \cdot 1 \cdot 24 = 1,2 \text{ мм}.$$

Масштабный эскиз паза дан на рис. 9.44, спецификация паза приведена в табл. 9.16.

27. Уточненное значение плотности тока в проводнике обмотки статора

$$J_1 = I_{\text{ном.ф}} / n q_{\text{ЭФ}} = 27,1 / 1 \cdot 12,42 \cdot 10^{-6} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

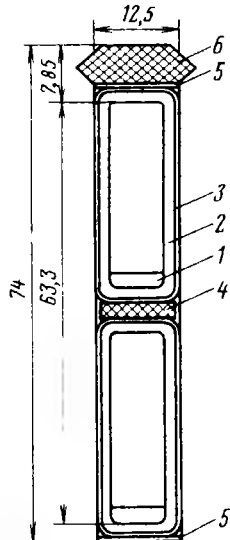
Таблица 9.15

№ вари- анта	Число пазов Z_1	Число сег- ментов s_{CT}	Хорда H , мм	Число пазов в сегменте $Z_s =$ Z_1/s_{CT}	Число па- зов на полуси фазу q_1	Число па- раллель- ных вет- вей a	Число про- водников в пазу i_{Π}	Пазовое (зубо- вое) де- ление $t'Z_1$, мм	Линейная нагрузка A , А/мм
1	$81 = 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3$	9	0,402	9	$2 \frac{1}{4}$	1	26	0,035	42 600
2	$90 = 2 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 3$	5	0,695	18	$2 \frac{1}{2}$	1	24	0,0314	44 000
3	$90 = 2 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 3$	6	0,59	15	$2 \frac{1}{2}$	1	24	0,0314	44 000
4	$90 = 2 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 3$	9	0,402	10	$2 \frac{1}{2}$	1	24	0,0314	44 000

Таблица 9.16 Спецификация пазов (изоляция класса нагревостойкости В)

Позиция на рис. 9.44	Наименование	Число слоев		Толщина, мм	
		по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	Провод ПЭТВСД $\frac{1,8 \times 7,1}{2,3 \times 7,6}$ мм	1	24	$1 \times 7,6$	$2 (12 \times 2,3)$
2	Лента стеклослюдинитовая ЛС 0,13 мм	6 слоев	Вполна- хлеста	4,5	4,5
3	Лента стеклянная ЛЭС (покровная) 0,1 мм	1 слой	Встык	0,2	0,2
4	Двусторонняя толщина изоляции одной катушки	—	—	4,7	4,7
5	Стеклотекстолит СТ1 толщиной 1 мм	—	2	—	2
5	Стеклотекстолит СТ1 толщиной 0,5 мм	—	2	—	1
	Общая толщина изоляции на паз	—	—	4,7	12,4
	Разбухание изоляции	—	—	0,05	1,2
	Допуск на укладку	—	—	0,2	0,2
6	Клин	—	—	—	5
	Всего	—	—	12,5	74

Рис. 9.44. Паз статора



28. Проверка индукции в зубце статора (приближенно) по (9.31):

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta \text{ ном}} \cdot t_{Z1} \cdot l_{\delta}}{(t_{Z1} - b_{п1}) \cdot l_{ст1} \cdot k_c} =$$

$$= \frac{0,89 \cdot 0,0314 \cdot 0,33}{(0,0314 - 0,0125) \cdot 0,301 \cdot 0,93} = 1,74 \text{ Тл.}$$

29. Проверка индукции в ярме статора (приближенно) по (9.32):

$$B_a = \frac{\alpha_{\delta} B_{\delta \text{ ном}} \tau l_{\delta}}{2 h_a l_{ст1} k_c} =$$

$$= \frac{0,66 \cdot 0,89 \cdot 0,236 \cdot 0,33}{2 \cdot 0,066 \cdot 0,301 \cdot 0,93} = 1,24 \text{ Тл;}$$

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{п1} = \frac{1,18 - 0,9}{2} - 0,074 = 0,066 \text{ м;}$$

B_{Z1} и B_a находятся в допустимых пределах.

30. Перепад температуры в изоляции паза по (9.33):

$$\Delta \vartheta_{из} = \frac{J_1 A k_{\Phi}}{4,2 \cdot 10^{11}} \frac{t_{Z1}}{2(b_{п1} + h_{п1} - h_k)} \frac{0,5 \delta_{из.п}}{\lambda_{из}} =$$

$$= \frac{4,6 \cdot 10^6 \cdot 44 \cdot 000 \cdot 1,1}{4,2 \cdot 10^{11}} \frac{0,0314}{2(0,0125 + 0,074 - 0,005)} \frac{0,5 \cdot 0,0047}{2,2 \cdot 10^{-5}} =$$

$$= 11,5^{\circ} \text{C} < 35^{\circ} \text{C.}$$

31. Градиент температуры в изоляции паза

$$\Delta \vartheta'_{из} = \Delta \vartheta_{из} / 0,5 \delta_{из.п} = 11 / 0,00235 = 4680,85^{\circ} \text{C/м.}$$

Проведенная проверка показала, что размеры паза выбраны удачно.

32. Витки фазы обмотки статора по (9.37)

$$\omega_1 = 2 p q_1 \frac{u_{п1}}{2} \frac{1}{a} = 2 \cdot 6 \cdot 2^{1/2} \frac{24}{2} 1 = 360.$$

33. Шаг обмотки по (9.38)

$$y_1 \approx (0,8 - 0,86) \tau_{п1} = (0,8 - 0,85) 7,5 = 6 \text{ (из 1-го в 7-й паз);}$$

$$\tau_{\pi} = 3q_1 = 3 \cdot 2 \frac{1}{2} = 7,5; \quad \beta = \frac{y_1}{\tau_{\pi}} = \frac{6}{7,5} = 0,8.$$

34. Коэффициент укорочения шага по (9.39)

$$k_y = \sin \frac{\pi}{2} \frac{y_1}{\tau_{\pi}} = \sin \frac{\pi}{2} \frac{6}{7,5} = 0,95.$$

35. Коэффициент распределения обмотки статора по (9.40)

$$k_p = \frac{0,5}{q_1 \sin \frac{\pi}{6q_1}} = \frac{0,5}{5 \sin \frac{\pi}{6 \cdot 5}} = 0,957.$$

Так как q_1 дробное, то в формулу вместо q_1 подставляется $(bd + c) = 5$.

36. Обмоточный коэффициент по (9.41)

$$k_{об1} = k_y k_p = 0,95 \cdot 0,957 = 0,909.$$

Воздушный зазор и полюсы ротора

37. Исходя из заданного отношения $M_{max}/M_{ном} \approx 2,2$ по рис. 9.18 находим $x_{d*} \approx 1,3$.

Приближенное значение воздушного зазора по (9.44)

$$\delta = 0,285 \frac{A}{B_{\delta 0}} \frac{\tau}{x_{d*}} 10^{-6} = 0,285 \frac{44\,000}{0,846} \frac{0,236}{1,30} 10^{-6} = 0,269 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$B_{\delta 0} = 0,95 B_{\delta ном} = 0,95 \cdot 0,89 = 0,846 \text{ Тл}.$$

38. Принимаем воздушный зазор под серединой полюса равным 0,0027 м (2,7 мм). Зазор под краями полюса $\delta_m = 1,5 \delta = 1,5 \cdot 2,7 \approx 4$ мм. Среднее значение воздушного зазора

$$\delta' = \delta + (\delta_m - \delta)/3 = 0,0027 + (0,004 - 0,0027)/3 = 0,00313 \text{ м} \quad (3,13 \text{ мм}).$$

39. Ширина полюсного наконечника определяется по (9.47). Примем $\alpha = 0,7$ (см. § 9.9):

$$b_p = \alpha \tau = 0,7 \cdot 0,236 = 0,165 \text{ м}.$$

40. Радиус дуги полюсного наконечника по (9.45)

$$R_p = \frac{D}{2 + 8D \frac{\delta_m - \delta}{b_p^2}} = \frac{0,9}{2 + 8 \cdot 0,9 \frac{0,004 - 0,0027}{0,165^2}} = 0,384 \text{ м}.$$

41. Высота полюсного наконечника по табл. 7.9 при $\tau = 0,236$ м

$$h_p = 0,031 \text{ м}.$$

42. Длина сердечника полюса и полюсного наконечника

$$l_m = l_p = l_1 - 0,01 = 0,36 - 0,01 = 0,35 \text{ м.}$$

43. Расчетная длина сердечника полюса определяется по (9.52). Принимаем $l_f = 0,02 \text{ м}$:

$$l'_m = l_m + l_f = 0,35 + 0,02 = 0,37 \text{ м.}$$

44. Предварительная высота полюсного сердечника по (9.48)

$$h_m \approx 0,016 + 0,186 \sqrt[4]{\tau} = 0,016 + 0,186 \sqrt[4]{0,236} = 0,146 \text{ м.}$$

45. Коэффициент рассеяния полюсов находится по (9.50). При $h_p = 0,031 \text{ м}$ $k = 7$ (см. с. 41):

$$\sigma_m = 1 + k \frac{0,35\delta}{\tau^2} = 1 + 7 \frac{0,35 \cdot 0,0027}{0,236^2} = 1,119.$$

46. Ширина полюсного сердечника определяется по (9.51). Задаемся $B_m = 1,43 \text{ Тл}$; $k_{cp} = 0,95$ (полюсы выполнены из стали марки Ст3 толщиной 1 мм):

$$b_m \approx \frac{\alpha_\delta B_{\text{ном}} \tau l_\delta}{B_m k_{cp} l'_m} \sigma_m = \frac{0,66 \cdot 0,89 \cdot 0,236 \cdot 0,33}{1,43 \cdot 0,95 \cdot 0,37} 1,119 = 0,102 \text{ м.}$$

Выбираем $b_m = 0,102 \text{ м}$.

Эскиз полюсов дан на рис. 9.45. Так как

$$v_p = \frac{\pi D n_{\text{ном}}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 500}{60} = 23,6 < 30 \text{ м/с,}$$

то принимаем крепление полюсов шпильками к ободу магнитного колеса.

47. Длина ярма (обода) ротора по (9.53)

$$l_j = l_m + \Delta l_c = 0,35 + 0,12 = 0,47 \text{ м.}$$

Выбрано $\Delta l_c = 0,12 \text{ м}$.

48. Минимальная высота ярма ротора по (9.54)

$$h_j = \frac{\alpha_\delta B_{\text{ном}} \tau l_\delta}{2 B_j l_j} \sigma_m = \frac{0,66 \cdot 0,89 \cdot 0,236 \cdot 0,33}{2 \cdot 1,2 \cdot 0,47} 1,119 = 0,045 \text{ м.}$$

Принято $B_j = 1,2 \text{ Тл}$; h_j уточняется по чертежу.

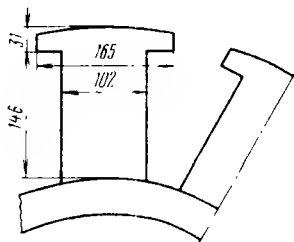


Рис. 9.45. Полюсы ротора

Пусковая обмотка

49. Число стержней пусковой обмотки на полюс

$$N_c = 6.$$

50. Поперечное сечение стержня пусковой обмотки по (9.55)

$$q_c = \frac{(0,25 - 0,35)\tau A}{N_c J_1} = \frac{0,3 \cdot 0,236 \cdot 44\,000}{6 \cdot 4,6 \cdot 10^6} = 112,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

51. Диаметр стержня находится по (9.56), материал стержня — медь: $d_c = 1,13 \sqrt{q_c} = 1,13 \sqrt{112,8 \cdot 10^{-6}} = 11,95 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (11,95 мм).

Выбираем $d_c = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, тогда $q_c = 113 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

52. Зубцовый шаг на роторе определяется по (9.57). Принимаем $z = 0,01 \text{ м}$:

$$l_{Z2} = \frac{b_p - d_c - 2z}{N_c - 1} = \frac{0,165 - 0,012 - 2 \cdot 0,01}{6 - 1} = 0,0266 \text{ м} \text{ (26,6 мм)}.$$

53. Проверяем условие (9.60):

$$0,8 l_{Z1} = 0,8 \cdot 0,0314 = 0,025 < l_{Z2} = 0,0266 \text{ м};$$

$$(N_c - 1) \left(1 - \frac{l_{Z2}}{l_{Z1}} \right) = (6 - 1) \left(1 - \frac{0,0266}{0,0314} \right) = 0,765 > 0,75.$$

Пазы ротора выбраны круглые, полужакрытые.

54. Диаметр паза ротора

$$d_s = d_c + 0,0001 = 0,0121 \text{ м} \text{ (12,1 мм)}.$$

Раскрытие паза $b_s \times h_s = 4 \times 2 \text{ мм}$.

55. Длина стержня по (9.61)

$$l_c = l_p + 0,34\tau = 0,35 + 0,34 \cdot 0,236 = 0,43 \text{ м}.$$

56. Сечение короткозамыкающегося сегмента

$$q_{кз} = b_{кз} h_{кз} = 0,5 N_c q_c = 0,5 \cdot 6 \cdot 113 \cdot 10^{-6} = 339 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ (339 мм}^2\text{)}.$$

По табл. П3.6 выбираем прямоугольную медь $10 \times 35 \text{ мм}$ (сечение $q_{кз} = 349,1 \text{ мм}^2$).

Расчет магнитной цепи

Для магнитопровода статора выбираем сталь марки 1511 (ГОСТ 214273-75) толщиной 0,5 мм. Полюсы ротора выполняют из стали марки Ст3 толщиной 1 мм. Крепление полюсов к ободу магнитного колеса осуществляют с помощью шпн-лек и гаек. Толщину обода (ярма ротора) принимают $h_j = 45 \text{ мм}$ (см. выше) (см. приложение 1).

57. Магнитный поток в зазоре по (9.62)

$$\Phi = \frac{E_1}{4k_B f w_1 k_{об1}} = \frac{E_1}{4 \cdot 1,152 \cdot 50 \cdot 360 \cdot 0,915} = 0,131 \cdot 10^{-4} E_1.$$

По рис. 9.21 при $\delta_m/\delta \approx 1,5$; $\alpha = 0,7$ и $\frac{\delta}{\tau} = \frac{0,0027}{0,236} = 0,0114$ находим $k_B = 1,154$ и $\alpha_\delta = 0,66$.

58. Уточненное значение расчетной длины статора по (9.64) равно:

$$l_\delta = l_1 - b'_k n_k + 2\delta' = 0,36 - 0,00423 \cdot 6 + 2 \cdot 0,00313 = 0,341 \text{ м};$$

$$b'_k = \gamma' \delta = 1,57 \cdot 0,27 \cdot 10^{-2} = 0,00423 \text{ м};$$

$$\gamma' = \frac{(b_k/\delta)^2}{5 + b_k/\delta} = \frac{[(1 \cdot 10^{-2})/(0,27 \cdot 10^{-2})]^2}{5 + (1 \cdot 10^{-2})/(0,27 \cdot 10^{-2})} = 1,57.$$

59. Индукция в воздушном зазоре по (9.63), Тл,

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta} = \frac{0,131 \cdot 10^{-4}}{0,66 \cdot 0,236 \cdot 0,341} E_1 = 2,466 \cdot 10^{-4} E_1.$$

60. Коэффициент воздушного зазора статора по (9.67)

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{Z1} + 10\delta'}{t_{Z1} - b_{п1} + 10\delta'} = \frac{3,14 \cdot 10^{-2} + 10 \cdot 0,313 \cdot 10^{-2}}{(3,14 - 1,25) \cdot 10^{-2} + 10 \cdot 0,313 \cdot 10^{-2}} = 1,25.$$

61. Коэффициент воздушного зазора ротора по (9.67)

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{Z2} + 10\delta'}{t_{Z2} - b_s + 10\delta'} = \frac{2,66 \cdot 10^{-2} + 10 \cdot 0,313 \cdot 10^{-2}}{(2,66 - 0,4) \cdot 10^{-2} + 10 \cdot 0,313 \cdot 10^{-2}} = 1,074.$$

62. Коэффициент воздушного зазора по (9.66)

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} = 1,25 \cdot 1,074 = 1,34.$$

63. Магнитное напряжение воздушного зазора по (9.65), А,

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta = \frac{1}{1,256 \cdot 10^{-6}} \cdot 2,466 \cdot 10^{-4} \cdot 0,27 \cdot 10^{-2} \cdot 1,34 E_1 = 0,71 E_1.$$

64. Ширина зубца статора на высоте $1/3 h_{п1}$ от его коронки по (9.70)

$$b_{Z1 \ 1/3} = t_{Z1 \ 1/3} - b_{п1} = 0,0329 - 0,0125 = 0,0204 \text{ м};$$

$$t_{Z1 \ 1/3} = \frac{\pi(D + 2h_{п1}/3)}{Z_1} = \frac{\pi(0,9 + 2 \cdot 0,074/3)}{90} = 0,0329 \text{ м}.$$

65. Индукция в сечении зубца на высоте $1/3 h_{п1}$ по (9.69), Тл,

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta} t_{Z1} l_{\delta}}{b_{Z1 \frac{1}{3}} l_{\sigma 1} k_c} = \frac{2,466 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0314 \cdot 0,341}{0,0204 \cdot 0,301 \cdot 0,93} E_1 =$$

$$= 4,62 \cdot 10^{-4} E_1.$$

66. Магнитное напряжение зубцов статора по (9.68), А,

$$F_{Z1} = h_{\pi 1} H_{Z1} = 0,074 H_{Z1}.$$

67. Индукция в спинке статора по (9.74), Тл,

$$B_a = \frac{\Phi}{2l_{\sigma 1} h_a k_c} = \frac{0,131 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,301 \cdot 0,066 \cdot 0,93} E_1 = 3,55 \cdot 10^{-4} E_1.$$

68. Магнитное напряжение спинки статора по (9.72), А,

$$F_a = \xi L_a H_a = 14,6 \cdot 10^{-2} \xi H_a;$$

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{4p} = \frac{\pi(1,18 - 0,066)}{4 \cdot 6} = 14,6 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

ξ — по рис. 9.22.

69. Высота зубца ротора по (9.76)

$$h_{Z2} = h_s + d_s = 0,2 \cdot 10^{-2} + 1,21 \cdot 10^{-2} = 1,41 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

70. Ширина зубца ротора по высоте $h_{Z2 \frac{1}{3}}$ от его коронки по (9.78)

$$b_{Z2 \frac{1}{3}} = \frac{D - 2\delta - \frac{2}{3} h_{Z2}}{D - 2\delta} r_{Z2} - 0,94 d_s =$$

$$= \frac{(90 - 2 \cdot 0,27 - \frac{2}{3} \cdot 1,41) \cdot 10^{-2}}{(90 - 2 \cdot 0,27) \cdot 10^{-2}} 2,65 \cdot 10^{-2} - 0,94 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2} =$$

$$= 1,48 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

71. Индукция в зубце ротора по (9.77), Тл,

$$B_{Z2} = \frac{B_{\delta} t_{Z2} l_{\delta}}{b_{Z2 \frac{1}{3}} l_p k_{c.p}} = \frac{2,48 \cdot 10^{-4} \cdot 2,65 \cdot 10^{-2} \cdot 34 \cdot 10^{-2}}{1,48 \cdot 10^{-2} \cdot 36 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95} E_1 =$$

$$= 4,41 \cdot 10^{-4} E_1.$$

72. Магнитное напряжение зубцов ротора по (9.75), А,

$$F_{Z2} = h_{Z2} H_{Z2} = 1,41 \cdot 10^{-2} H_{Z2}.$$

73. Удельная магнитная проводимость рассеяния между внутренними поверхностями сердечника полюсов по (9.81)

$$\lambda_{ml} = \frac{0,55 h_m \cdot 10^{-6}}{\tau - b_m - \frac{\pi}{2p} (h_m + 2h_p + 2\delta)} =$$

$$= \frac{0,55 \cdot 14,6 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-6}}{\left[23,6 - 10,2 - \frac{\pi}{2 \cdot 6} (14,6 + 2 \cdot 3,1 + 2 \cdot 0,27) \right] \cdot 10^{-2}} = 1,027 \cdot 10^{-6}.$$

74. Удельная магнитная проводимость между внутренними поверхностями полюсных наконечников по (9.82)

$$\lambda_{pl} = \left[1,4 \left(\frac{d_t}{a_p} - 0,25 \right) + 0,55 \left(\frac{c_p}{a_p} + 0,2 \right) - \right.$$

$$\left. - 0,4 \left(\frac{c_p}{a_p} - 0,5 \right)^2 \right] \cdot 10^{-6} = \left[1,4 \left(\frac{2,614 \cdot 10^{-2}}{5,73 \cdot 10^{-2}} - 0,25 \right) + \right.$$

$$\left. + 0,55 \left(\frac{3,15 \cdot 10^{-2}}{5,73 \cdot 10^{-2}} + 0,2 \right) - 0,4 \left(\frac{3,15 \cdot 10^{-2}}{5,73 \cdot 10^{-2}} - 0,5 \right)^2 \right] \cdot 10^{-6} = 0,7 \cdot 10^{-6},$$

где

$$c_p = \frac{b_p - b_m}{2} = \frac{16,5 - 10,2}{2} 10^{-2} = 3,15 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$d_t = h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4D} = (3,1 + 0,27) \cdot 10^{-2} - \frac{16,5^2 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 90 \cdot 10^{-2}} = 2,614 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$a'_p = \tau - b_p - \frac{\pi d_t}{p} = \left(23,6 - 16,5 - \frac{3,14 \cdot 2,614}{6} \right) 10^{-2} = 5,73 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

75. Удельная магнитная проводимость рассеяния между торцевыми поверхностями по (9.83)

$$\lambda_{mb} = 0,37 \frac{b_m}{l'_m} 10^{-6} = 0,37 \frac{10,2 \cdot 10^{-2}}{37 \cdot 10^{-2}} 10^{-6} = 0,102 \cdot 10^{-6}.$$

76. Удельная магнитная проводимость для потока рассеяния

$$\lambda_{m\sigma} = \lambda_{ml} + \lambda_{pl} + \lambda_{mb} = (1,027 + 0,7 + 0,102) \cdot 10^{-6} = 1,829 \cdot 10^{-6}.$$

77. Магнитное напряжение ярма статора, зазора и зубцов полюсного наконечника, А,

$$F_{\delta Za} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_a + F_{Z2}.$$

78. Поток рассеяния полюса по (9.80), Вб,

$$\Phi_{\sigma} = 4\lambda_{m\sigma} l'_{m\sigma} F_{\delta Z a} = 4 \cdot 1,829 \cdot 10^{-6} \cdot 37 \cdot 10^{-2} F_{\delta Z a} = \\ = 2,71 \cdot 10^{-6} F_{\delta Z a}.$$

79. Поток в сечении полюса у его основания, Вб,

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_{\sigma} = 0,131 \cdot 10^{-4} E_1 + 2,71 \cdot 10^{-6} F_{\delta Z a}.$$

80. Индукция в полюсе по (9.84), Тл,

$$B_m = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma}}{l'_m b_m k_{cp}} = \frac{0,131 \cdot 10^{-4} E_1 + 2,71 \cdot 10^{-6} F_{\delta Z a}}{37 \cdot 10^{-2} \cdot 10,2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95} = \\ = 0,364 \cdot 10^{-3} E_1 + 0,764 \cdot 10^{-4} F_{\delta Z a}.$$

81. Магнитное напряжение полюса по (9.79), А,

$$F_m = h_{mp} H_m = 17,7 \cdot 10^{-2} H_m,$$

где

$$h_{mp} = h_m + h_p = (14,6 + 3,1) \cdot 10^{-2} = 17,7 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

82. Магнитное напряжение стыка между полюсом и ярмом ротора по (9.86), А,

$$F_{\delta mj} = 250 B_m.$$

83. Индукция в ободке магнитного колеса (ярме ротора), по (9.88), Тл,

$$B_j = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma}}{2l_j h_j k_{cp}} = \frac{0,131 \cdot 10^{-4} E_1 + 2,71 \cdot 10^{-6} F_{\delta Z a}}{2,47 \cdot 10^{-2} \cdot 4,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1} = \\ = 0,312 \cdot 10^{-3} E_1 + 0,645 \cdot 10^{-4} F_{\delta Z a}.$$

84. Магнитное напряжение в ободке магнитного колеса по (9.87), А,

$$F_j = L_j H_j = 6,48 \cdot 10^{-2} H_j,$$

где

$$L_j = \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_{mp} - h_j)}{4p} = \\ = \frac{\pi(90 - 2 \cdot 0,27 - 2 \cdot 17,7 - 4,5) \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 6} = 6,48 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

85. Сумма магнитных напряжений сердечника полюса, ярма ротора и стыка между полюсом и ярмом, А,

$$F_{mj} = F_m + F_{\delta mj} + F_j.$$

86. Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи, А,

$$F_{f0} = F_{\delta Z a} + F_{mj} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_a + F_{Z2} + F_m + F_{\delta mj} + F_j.$$

Результаты расчета магнитной цепи сведены в табл. 9.17.

При переводе магнитных напряжений F_{f0} , $F_{\delta Z a}$, F_{mj} и потоков Φ и Φ_m в относительные единицы за базовые значения соответственно приняты МДС F_{f0} и Φ при $E_1 = U_{\text{ном.ф}} (E_{1*} = 1)$.

По табл. 9.17 на рис. 9.46 построена в относительных единицах характеристика холостого хода $E_{1*} = f(F_{f0*})$. На этом же рисунке приведена нормальная характеристика холостого хода.

Параметры обмотки статора для установившегося режима

87. Средняя длина витка обмотки статора

$$l_{cp1} = 2(l_1 + l_{л1}) = 2(0,36 + 0,384) = 1,488 \text{ м.}$$

88. Длина лобовой части обмотки статора по (8.139)

$$l_{л1} = \frac{\pi(D + h_{п1})\beta}{2p \sqrt{1 - \left(\frac{b_1 + s_i}{t_{Z1}}\right)^2}} + h_{п1} + 2B_1 =$$

$$= \frac{\pi(0,9 + 0,074)0,8}{2 \cdot 6 \sqrt{1 - \left(\frac{0,0071 + 0,0065}{0,034}\right)^2}} + 0,074 + 2 \cdot 0,045 = 0,384 \text{ м,}$$

где $b_1 = 0,0071$ м — ширина проводника; B_1 и S_i по табл. 8.24.

89. Активное сопротивление обмотки статора по (9.95)

$$r_1(20) = \frac{w_1 l_{cp1}}{57 \cdot 10^6 q_{\text{эф}} a} = \frac{360 \cdot 1,488}{57 \cdot 10^6 \cdot 12,42 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,757 \text{ Ом}$$

при $\vartheta = 20^\circ \text{C}$;

$$r_1(75) = 1,20 r_1(20) = 1,20 \cdot 0,757 = 0,91$$

при $\vartheta = 75^\circ \text{C}$.

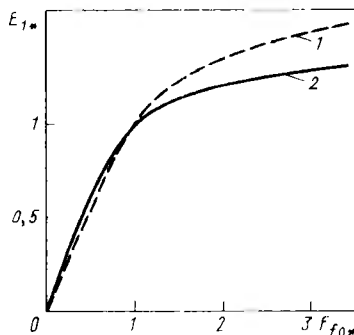


Рис. 9.46. Характеристика холостого хода:

1 — расчетная характеристика; 2 — нормальная характеристика.

Таблица 9.17

Расчетная величина	Единица величины	E_{1*} и Φ_*				
		0,5	1	1,1	1,2	1,3
E_1	B	1734	3468	3814,8	4161,6	4508,4
$\Phi = 0,131 \cdot 10^{-4} E_1$	B6	0,0227	0,0454	0,05	0,0545	0,0591
$B_\delta = 2,466 \cdot 10^{-4} E_1$	Tn	0,428	0,86	0,941	1,026	1,112
$F_\delta = 0,71 E_1$	A	1231	2462,3	2708,5	2954,7	3201
$B_{Z1} = 4,62 \cdot 10^{-4} E_1$	Tn	0,8	1,6	1,76	1,92	2,08
H_{Z1}	A/м	254	6700	19 000	29 000	61 000
$F_{Z1} = 0,074 H_{Z1}$	A	18,8	495,8	1406	2146	4514
$B_a = 3,55 \cdot 10^{-4} E_1$	Tn	0,62	1,23	1,35	1,48	1,6
ξ		0,63	0,42	0,4	0,32	0,3
H_a	A/м	156	810	1410	3370	6700
$F_a = 14,6 \cdot 10^{-2} \xi H_a$	A	14,3	49,6	82,3	157	293,5
$B_{Z2} = 4,41 \cdot 10^{-4} E_1$	Tn	0,76	1,53	1,68	1,84	1,99
H_{Z2}	A/м	380	2710	6230	13 400	26 200
$F_{Z2} = 1,41 \cdot 10^{-2} H_{Z2}$	A	5,36	38,21	87,8	188,9	369,4
$F_{\delta Z a} = F_\delta + F_{Z1} + F_a + F_{Z2}$	A	1269,5	3045,9	4284,6	5446,6	8377,9
$\Phi_\sigma = 2,71 \cdot 10^{-6} F_{\delta Z a}$	B6	0,0034	0,0083	0,012	0,015	0,023
$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = 0,131 \cdot 10^{-4} E_1 + 2,71 \cdot 10^{-6} F_{\delta Z a}$	B6	0,026	0,0537	0,062	0,07	0,082
$B_m = 0,364 \cdot 10^{-3} E_1 + 0,764 \cdot 10^{-4} F_{\delta Z a}$	Tn	0,73	1,49	1,72	1,93	2,28
H_m	A/м	363	2110	4752	12 508	37 167
$F_m = 17,7 \cdot 10^{-2} H_m$	A/м	64,25	373,5	841	2214	6578

$F_{\delta m j} = 250 B_m$	A	182,5	372,5	430	482,5	570
$B_j = 0,312 \cdot 10^{-3} E_1 + 0,645 \cdot 10^{-4} F_{\delta Z a}$	Тл	0,622	1,276	1,47	1,63	1,95
H_j	A/м	506	1500	2620	4550	9600
$F_j = 6,48 \cdot 10^{-2} H_j$	A	32,8	97,2	169,8	294,3	622
$F_{m j} = F_m + F_{\delta m j} + F_j$	A	279,5	843,2	1440,8	2991,3	7770
$F_{f 0} = F_{\delta Z a} + F_{m j}$	A	1549	3888	5725	8437,9	16148
$F_{f 0*}$	-	0,398	1	1,47	2,17	4,15
Φ_{m*}	-	0,575	1,18	1,37	1,54	1,81
Φ_{0*}	-	0,075	0,18	0,27	0,34	0,51
$F_{\delta Z a*}$		0,326	0,78	1,1	1,4	2,15
$F_{m j*}$		0,072	0,22	0,37	0,77	2
$F_{\delta Z 0} / F_{\delta}$		1,03	1,24	1,58	1,84	2,62

Примечания: 1. При определении магнитного напряжения зубцов в тех случаях, когда $B_Z > 1,8T$ ($E_{1*} = 1,2$ и $E_{1*} = 1,3$), учитывалось отвлечение потока в паз по коэффициентам:
для статора

$$k_{1n 1/3} = \frac{l_{Z1 1/3} l_1}{b_{Z1 1/3} l_{ст1} k_c} - 1 = \frac{3,32 \cdot 10^{-2} \cdot 36 \cdot 10^{-2}}{2,04 \cdot 10^{-2} \cdot 30,1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,93} - 1 = 1,09;$$

для ротора

$$k_{2n 1/3} = \frac{l_{Z2 1/3} l_p}{b_{Z2 1/3} l_{пkcp}} - 1 = \frac{2,62 \cdot 10^{-2} \cdot 35 \cdot 10^{-2}}{1,48 \cdot 10^{-2} \cdot 35 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95} - 1 = 0,86.$$

2. При $B_m \geq 1,6$ Тл магнитное напряжение полюса определялось по трем сечениям.

90. Активное сопротивление обмотки статора в относительных единицах по (9.96)

$$r_{1(75^\circ)}/Z_6 = 0,91/60,7 = 0,015;$$

$$Z_6 = U_{\text{ном.ф}}/I_{\text{ном.ф}} = 60,7 \text{ Ом.}$$

91. Индуктивное сопротивление рассеяния по (9.97)

$$\begin{aligned} x_\sigma &= 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l_\delta}{pq} (\lambda_{\text{п.к}} + \lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{д}}) = \\ &= 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{360}{100} \right)^2 \frac{0,34}{6 \cdot 2,5} (2,215 + 0,66 + 0,442) = 7,7 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

92. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния по (9.98)

$$\lambda_{\text{п.к}} = \lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{к}} = 2 + 0,215 = 2,215.$$

Коэффициент магнитной проводимости между стенками паза по табл. 8.24

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{п}} &= \frac{h_2 - h_0}{3b_{\text{п1}}} k_\beta + \frac{h_1}{b_{\text{п1}}} k'_\beta + \frac{h_0}{4b_{\text{п1}}} = \\ &= \frac{(6,33 - 0,67) 10^{-2}}{3 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2}} 0,89 + \frac{0,785 \cdot 10^{-2}}{1,25 \cdot 10^{-2}} 0,85 + \\ &+ \frac{0,67 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1,22 \cdot 10^{-2}} = 2. \end{aligned}$$

Размеры паза по рис. 8.50, а и 9.44: $h_2 = 6,33 \text{ см}$; $b_{\text{п1}} = 1,25 \text{ см}$; $h_1 = 0,785 \text{ см}$; $h_0 = 0,67 \text{ см}$.

При $\beta = y_1/\tau = 0,8$ по (8.156)

$$k'_\beta = \frac{1 + 3\beta}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0,8}{4} = 0,85;$$

$$k_\beta = \frac{1 + 3k'_\beta}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0,85}{4} = 0,89.$$

Коэффициент магнитной проводимости по коронкам зубцов по (9.99)

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{к}} &= \left[\alpha \lambda'_{\text{к}} + \left(0,22 + 0,32 \sqrt{\frac{Z_1 - b_{\text{п1}}}{b_{\text{п1}}}} \right) (1 - \alpha) \right] k'_\beta = \\ &= \left[0,7 \cdot 0,1 + \left(0,22 + 0,32 \sqrt{\frac{(3,14 - 1,25) \cdot 10^{-2}}{1,25 \cdot 10^{-2}}} \right) (1 - 0,7) \right] 0,85 = \\ &= 0,215. \end{aligned}$$

$$\text{При } \frac{b_{п1}}{\delta' k_{\delta}} = \frac{1,25 \cdot 10^{-2}}{0,313 \cdot 10^{-2} \cdot 1,35} = 2,96 \text{ из рис. 9.26 } \lambda'_{\kappa} = 0,1.$$

93. Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния по (8.159)

$$\lambda_{\text{л}} = 0,34 \frac{q_1}{l_{\delta}} (l_{\text{л}} - 0,64 \beta \tau) = 0,34 \frac{2,5}{34,1 \cdot 10^{-2}} (0,384 - 0,64 \cdot 0,8 \times \\ \times 23,6 \cdot 10^{-2}) = 0,66.$$

94. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния по (9.100)

$$\lambda_{\text{д}} = 0,03 \frac{\tau a_{\delta}}{\delta' k_{\delta} q_1} = 0,03 \frac{23,6 \cdot 10^{-2} \cdot 0,66}{0,313 \cdot 10^{-2} \cdot 1,35 \cdot 2,5} = 0,442.$$

95. Индуктивное сопротивление рассеяния в относительных единицах

$$x_{\sigma*} = x_{\sigma} / Z_{\text{б}} = 7,7 / 60 \cdot 6 = 0,13.$$

96. Индуктивное сопротивление продольной реакции якоря в относительных единицах по (9.102)

$$x_{ad*} = \frac{k_{ad} F_{a \text{ ном}}}{k_{\mu 0} F_{\delta 0}} = \frac{0,87 \cdot 4232}{1,26 \cdot 2462,3} = 1,187,$$

где

$$F_{a \text{ ном}} = 0,45 m \frac{\omega_1 k_{об1}}{p} I_{\text{ном.ф}} = 0,45 \cdot 3 \frac{360 \cdot 0,915}{6} 57,1 = 4232 \text{ А}$$

по (9.90); $k_{ad} = 0,87$ из рис. 9.23. По характеристике холостого хода (см. табл. 9.17) для $E_{1*} = 1$ МДС $F_{\delta 0} = 2462,3 \text{ А}$.

Для ЭДС $E_{1*} = 0,5$

$$k_{\mu 0} = F_{f0} / F_{\delta} = 1549 / 1231 = 1,26.$$

97. Индуктивное сопротивление поперечной реакции якоря в относительных единицах по (9.103)

$$x_{aq*} = \frac{k_{aq} F_{a \text{ ном}}}{k_{\mu 0} F_{\delta 0}} \frac{1 + k_{\delta}}{2} = \\ = \frac{0,435 \cdot 4232}{1,26 \cdot 2462,3} \frac{1 + 1,35}{2} = 0,697;$$

$k_{aq} = 0,435$ по рис. 9.23.

98. Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси в относительных единицах

$$x_{d*} = x_{\sigma*} + x_{ad*} = 0,13 + 1,187 = 1,317.$$

99. Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси в относительных единицах

$$x_{q*} = x_{\sigma*} + x_{aq*} = 0,13 + 0,697 = 0,827.$$

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения при нагрузке

100. По табл. 9.17 на рис. 9.47 построены частичные характеристики намагничивания $\Phi_* = E_{1*} = f(F_{\delta Z a*})$, $\Phi_{\sigma*} = f(F_{\delta Z a*})$, $\Phi_{m*} = f(F_{mj*})$, а на рис. 9.48 — зависимость

$$E_* = f(F_{\delta Z a} / F_{\delta}).$$

Из векторной диаграммы для номинального режима ($I_* = 1$, $U_* = 1$ и $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$) (рис. 9.49) определяем $E_{\delta*} = 1,07$.

Из рис. 9.48 по $E_{\delta*} = 1,07$ находим $F_{\delta Z a} / F_{\delta} = 1,45$, а затем из рис. 9.25 $\kappa_d = -0,92$; $\kappa_q = 0,62$ и $k = 0,0026$.

101. Для дальнейшего построения векторной диаграммы определяем МДС:

$$F_{aq*}^2 / \cos \psi = \kappa_q k_{aq} F_{a \text{ ном}*} = 0,62 \cdot 0,435 \cdot 1,09 = 0,294,$$

где $F_{a \text{ ном}*} = F_{a \text{ ном}} / F_{f\delta} = 4232 / 3888 = 1,09$; $F_{f\delta}$ — базовое значение МДС возбуждения (соответствует $E_{1*} = 1$).

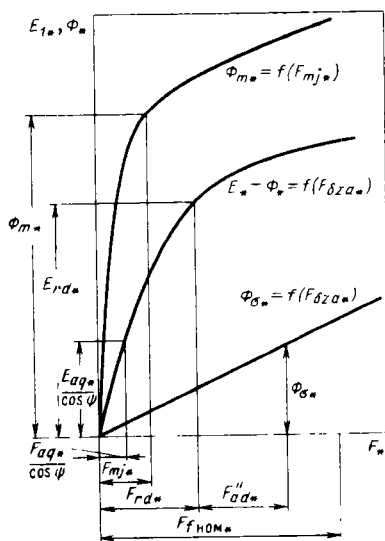


Рис. 9.47. Частичные характеристики намагничивания

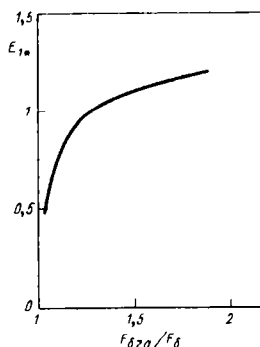
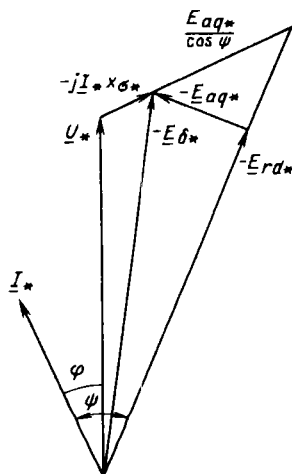


Рис. 9.48. Зависимость $E_* = f(F_{\delta Z a} / F_{\delta})$

Рис. 9.49. Векторная диаграмма для номинальной нагрузки



По найденной МДС из характеристики $E_* = f(F_{\delta Z a_*})$ определяемая ЭДС $F_{aq*} / \cos \psi = 0,42$ (см. рис. 9.47), отложив которую на векторной диаграмме, получим направление, а затем и модуль $E_{rd*} = \Phi_{rd*} = 1,03$.

Находим $\psi = 46^\circ$, $\cos \psi = 0,69$; $\sin \psi = 0,72$. Из характеристики $E_{1*} = f(F_{\delta Z a_*})$ по E_{rd*} определяем $F_{rd*} = 0,86$.

102. Полная МДС реакции якоря по продольной оси, А,

$$F_{ad*}'' = \tilde{\kappa}_d k_{ad} F_{a \text{ ном}*} \sin \psi + \tilde{k} (\tau / \delta) F_{a \text{ ном}*} \cos \psi =$$

$$= 0,92 \cdot 0,87 \cdot 1,09 \cdot 0,72 + 0,0026 \frac{23,6 \cdot 10^{-2}}{0,27 \cdot 10^{-2}} 1,09 \cdot 0,69 = 0,8.$$

По сумме $(F_{rd*} + F_{ad*}'') = (0,86 + 0,8) = 1,66$ из характеристики $\Phi_{\sigma*} = f(F_{\delta Z a_*})$ определяем $\Phi_{\sigma*} = 0,39$. Поток полюса $\Phi_{m*} = \Phi_{rd*} + \Phi_{\sigma*} = 1,03 + 0,39 = 1,42$.

Из характеристики $\Phi_{m*} = f(F_{mj*})$ по потоку $\Phi_{m*} = 1,42$ определяем $F_{mj*} = 0,46$.

103. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения в относительных единицах при номинальной нагрузке, А

$$F_{f \text{ ном}*} = F_{rd*} + F_{ad*}'' + F_{mj*} = 0,86 + 0,8 + 0,46 = 2,12.$$

104. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения, А,

$$F_{f \text{ ном}} = F_{f \text{ ном}*} F_{f \text{ б}} = 2,12 \cdot 3888 = 8243.$$

Обмотка возбуждения

Выбираем однорядную обмотку с лобовой частью в виде полуокружности. Изоляция класса нагревостойкости В.

105. Средняя длина витка обмотки возбуждения

$$l_{f \text{ ср}} = 2(l_m - 2\delta'') + \pi(b_m + 2\delta_1 + b_f) =$$

$$= 2(35 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}) + \pi(10,2 \cdot 10^{-2} +$$

$$+ 2 \cdot 0,15 \cdot 10^{-2} + 1,4 \cdot 10^{-2}) = 101,36 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

где $\delta_1 = 0,15 \cdot 10^{-2}$ м, $\delta'' = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $b_f \approx 0,06\tau = 0,06 \cdot 23,6 \cdot 10^{-2} \approx 1,4 \times 10^{-2}$ м.

Для питания обмотки возбуждения по табл. 9.10 выбираем тиристорное возбуждательное устройство ТВУ-65-320 ($U_{f\text{ном}} = 65$ В, $I_{f\text{ном}} = 320$ А). Напряжение на кольцах с учетом переходного падения напряжения в щеточном контакте принимаем $U_f = 63$ В.

106. Сечение проводников обмотки возбуждения (предварительное значение) по (9.107)

$$q_f = \frac{\rho_{130} 2p F'_{f\text{ном}} l_{f\text{ср}}}{U_f} =$$

$$= \frac{1}{39 \cdot 10^6} \frac{2 \cdot 6 \cdot 9892 \cdot 101,36 \cdot 10^{-2}}{63} = 49 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где $F'_{f\text{ном}} = 1,2 F_{f\text{ном}} = 1,2 \cdot 8243 = 9892$.

107. Ток возбуждения по (9.111)

$$I_{f\text{ном}} = q_f J_f = 49 \cdot 10^{-6} \cdot 5,26 \cdot 10^6 = 258 \text{ А}.$$

Принимаем $J_f = 5,26 \cdot 10^6$ А/м².

108. Число витков обмотки возбуждения по (9.112)

$$F_{f\text{ном}} / I_{f\text{ном}} = 8243 / 258 \approx 32.$$

109. Меньший размер прямоугольного проводника обмотки возбуждения по (9.114), м,

$$a_f = \frac{h_m - \delta_{\text{к.п}}}{w_f + 1} - \delta_{\text{п}} = \frac{14,6 \cdot 10^{-2} - 1,4 \cdot 10^{-2}}{32 + 1} -$$

$$- 0,03 \cdot 10^{-2} = 0,37 \cdot 10^{-2}.$$

Принимаем $\delta_{\text{к.п}} = 1,4 \cdot 10^{-2}$ м; $\delta_{\text{п}} = 0,03 \cdot 10^{-2}$ м. По приложению 3 выбираем проводник с размерами $a_f \times b_f = 3,75 \times 14$ мм ($q_f = 51,95 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$).

110. Расстояние между катушками соседних полюсов по (9.116)

$$x \approx \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_p - 2h_m)}{2p} - b_m - 2\delta_1 - 2b_f =$$

$$= \frac{\pi(90 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 0,27 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 3,1 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 14,6 \cdot 10^{-2})}{2 \cdot 6} -$$

$$- 10,2 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 0,15 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2} = 0,846 \cdot 10^{-2}.$$

111. Плотность тока в обмотке возбуждения (уточненное значение)

$$J_f = \frac{I_{f \text{ ном}}}{q_f} = \frac{258}{51,95 \cdot 10^{-6}} = 4,97 \cdot 10^6, \text{ А/м}^2.$$

112. Превышение температуры обмотки возбуждения по (9.119)

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_f &= \frac{3 \cdot 10^{-10} (2,8 + l_1/\tau) b_f J_f^2}{1,6 + \sqrt{V_p}} = \\ &= \frac{3 \cdot 10^{-10} \left(2,8 + \frac{36 \cdot 10^{-2}}{23,6 \cdot 10^{-2}} \right) 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot 4,97^2 \cdot 10^{12}}{1,6 + \sqrt{23,5}} = \\ &= 69,7^\circ \text{C} < 80^\circ \text{C}; \end{aligned}$$

$$V_p = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi \cdot 90 \cdot 10^{-2} \cdot 500}{60} = 23,5 \text{ м/с}.$$

113. Уточненное значение высоты полюса

$$\begin{aligned} h_m &= (a_f + \delta_n) (w_f + 1) + \delta_{\text{к.п}} = (0,375 \cdot 10^{-2} + 0,03 \cdot 10^{-2}) (32 + 1) + \\ &+ 1,4 \cdot 10^{-2} = 14,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}. \end{aligned}$$

Так как расхождение с ранее выбранной высотой $h_m = 14,6 \cdot 10^{-2}$ м составляет 1,5%, то пересчет магнитного напряжения полюса не производим.

114. Активное сопротивление обмотки возбуждения по (9.120)

$$\begin{aligned} r_{f(130)} &= \rho_{(130)} \frac{2 p w_f l_{f \text{ ср}}}{q_f} = \frac{1}{39 \cdot 10^6} \frac{2,6 \cdot 32 \cdot 1,0136}{51,95 \cdot 10^{-6}} = 0,192 \text{ Ом}; \\ r_{f(15)} &= 0,192 \frac{39}{46} = 0,163 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

115. Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при номинальной нагрузке и $\vartheta = 130^\circ \text{C}$ по (9.121)

$$U'_{f \text{ ном}} = I_{f \text{ ном}} r_{f(130)} = 258 \cdot 0,192 = 49,5 \text{ В}.$$

116. Коэффициент запаса возбуждения по (9.122)

$$\frac{U_{f \text{ ном}}}{U'_{f \text{ ном}} + \Delta U_{\text{щ}}} = \frac{65}{49,5 + 2} = 1,26.$$

Параметры и постоянные времени

117. Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения по (9.123)

$$x_{f*} = 1,27 k_{ad} x_{ad*} \left(1 + \frac{4 k_{\mu 0} F_{\delta 0} l'_m \Sigma \lambda}{\Phi_6} \right) =$$

$$= 1,27 \cdot 0,87 \cdot 1,187 \left(1 + \frac{4 \cdot 1,26 \cdot 2462,3 \cdot 37 \cdot 10^{-2} \cdot 1,41 \cdot 10^{-6}}{0,0454} \right) = 1,5,$$

где

$$\Sigma \lambda = \left(\lambda_{pl} + \frac{\lambda_{ml}}{1,53} + \frac{\lambda_{mb}}{2,65} \right) =$$

$$= \left(0,7 + \frac{1,027}{1,53} + \frac{0,102}{2,65} \right) 10^{-6} = 1,41 \cdot 10^{-6}.$$

118. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения по (9.124)

$$x_{\sigma f*} = x_{f*} \quad x_{ad*} = 1,5 \cdot 1,187 = 0,313.$$

119. Индуктивное сопротивление рассеяния пусковой обмотки по продольной оси находим по (9.125).

По отношению

$$t_{Z2}/\tau = 2,66 \cdot 10^{-2} / 23,6 \cdot 10^{-2} = 0,112$$

при $N_c = 6$ из рис. 9.38 определяем $k_b = 0,40$; $1 + k_b = 1,40$; $1 - k_b = 0,60$.

Из рис. 9.37 находим $C_d = 1$; $C_q = 1,7$ Тогда

$$\lambda_b = \left(0,785 \quad \frac{b_s}{2d_s} \right) + \frac{h_s}{b_s} = \left(0,785 \quad \frac{0,4 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2}} \right) +$$

$$+ \frac{0,2 \cdot 10^{-2}}{0,4 \cdot 10^{-2}} = 1,12;$$

$$\lambda_{д.у} = \frac{t_{Z2}}{12\delta' k_{\delta}} = \frac{2,66 \cdot 10^{-2}}{12 \cdot 0,313 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 35} = 0,52;$$

$$\lambda_{Rd} = 0,19 \frac{23,6 \cdot 10^{-2} \cdot 1}{6} = 0,71 \cdot 10^{-2};$$

$$x_{kd*} = 7,9 \frac{F_{a \text{ ном}}}{\Phi_6} \frac{10^{-6}}{1 - k_b} \left[\frac{l_p}{N_c} (\lambda_b + \lambda_{д.у}) + \lambda_{Rd} \right] =$$

$$= 7,9 \frac{4232 \cdot 10^{-6}}{0,0454 (1 - 0,4)} \left[\frac{0,35}{6} (1,12 + 0,52) + 0,71 \cdot 10^{-2} \right] = 0,126.$$

120. Индуктивное сопротивление рассеяния пусковой обмотки по поперечной оси по (9.126)

$$x_{kq*} = 7,9 \frac{F_{a \text{ ном}}}{\Phi_6} \frac{10^{-6}}{1 + k_B} \left[\frac{l_p}{N_c} (\lambda_B + \lambda_{д.у}) + \lambda_{Rq} \right] =$$

$$= 7,9 \frac{4232}{0,0454} \frac{10^{-6}}{1,40} \left[\frac{0,35}{6} (1,12 + 0,52) + 0,013 \right] = 0,057$$

где

$$\lambda_{Rq} = 0,19 \frac{\tau C_q}{N_c} = 0,19 \frac{23,6 \cdot 10^{-2} \cdot 1,7}{6} = 1,3 \cdot 10^{-2}.$$

121. Активное сопротивление обмотки возбуждения при $\vartheta = 75^\circ \text{C}$ по (9.136)

$$r_{f*} = \frac{0,44}{10^8} \frac{F_{a \text{ ном}} k_{ad}^2 l_{fcp}}{\Phi_6 f \omega_f q_f} =$$

$$= \frac{0,44}{10^8} \frac{4232 \cdot 0,87^2 \cdot 101,36 \cdot 10^{-2}}{0,0454 \cdot 50 \cdot 32 \cdot 51,95 \cdot 10^{-6}} = 0,0038.$$

122. Активное сопротивление пусковой обмотки по продольной оси при $\vartheta = 75^\circ \text{C}$ по (9.136)

$$r_{kd*} = \frac{2,16}{10^8} \frac{F_{a \text{ ном}}}{f \Phi_6} \frac{1}{1 - k_b} \left(\frac{c_c l_c}{q_c N_c} + \frac{c_{к.з} \tau C_d}{q_{к.з} N_c} \right) =$$

$$= \frac{2,16 \cdot 4232 \cdot 1}{10^8 \cdot 50 \cdot 0,0454 \cdot (1 - 0,4)} \left(\frac{0,43}{113 \cdot 10^{-6} \cdot 6} + \frac{0,236 \cdot 1}{349,1 \cdot 10^{-6} \cdot 6} \right) = 0,05;$$

$$C_c = C_{к.з} = 1.$$

123. Активное сопротивление пусковой обмотки по поперечной оси при $\vartheta = 75^\circ \text{C}$ по (9.137)

$$r_{kq*} = \frac{2,16}{10^8} \frac{F_{a \text{ ном}}}{f \Phi_6} \frac{1}{1 - k_b} \left(\frac{c_c l_c}{q_c N_c} + \frac{c_{к.з} \tau C_q}{q_{к.з} N_c} \right) =$$

$$= \frac{2,16}{108} \frac{4232}{50 \cdot 0,0454} \frac{1}{1 + 0,4} \left(\frac{0,43}{113 \cdot 10^{-6} \cdot 6} + \frac{0,236 \cdot 1,7}{349,1 \cdot 10^{-6} \cdot 6} \right) = 0,024.$$

Масса активных материалов

124. Масса зубцов статора по (9.147)

$$m_{Z1} = 7800 l_{ст1} k_c h_{п1} b_{Z1/2} Z_1 = 7800 \cdot 30,1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,93 \cdot 7,4 \cdot 10^{-2} \times$$

$$\times 2,15 \cdot 10^{-2} \cdot 90 = 312,6 \text{ кг},$$

где

$$b_{Z1/2} = \frac{\pi(D + h_{п1})}{Z_1} - b_{п1} = \frac{\pi \cdot (90 \cdot 10^{-2} + 7,4 \cdot 10^{-2})}{90} -$$

$$1,25 \cdot 10^{-2} = 2,15 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

125. Масса ярма статора по (9.148)

$$m_a = 7800 l_{ст1} k_c \pi (D_a - h_a) h_a = 7800 \cdot 30,1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,93 \cdot 3,14 \times \\ \times (118 \cdot 10^{-2} - 6,6 \cdot 10^{-2}) 6,6 \cdot 10^{-2} = 504,1 \text{ кг.}$$

126. Масса меди обмотки статора по (9.149)

$$m_{м1} = 8900 q_{эф} u_{п} Z_1 l_{ср 1/2} = 8900 \cdot 12,42 \cdot 10^{-6} \cdot 24 \cdot 90 \cdot 1,488/2 = \\ = 177,6 \text{ кг.}$$

127. Масса меди обмотки возбуждения по (9.159)

$$m_{mf} = 8900 q_f l_{фср} 2p w_f = 8900 \cdot 51,95 \cdot 10^{-6} \cdot 101,36 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 6 \cdot 32 = 180 \text{ кг.}$$

128. Масса меди стержней пусковой обмотки по (9.151)

$$m_{м.с} = 8900 q_c 2p N_c l_c = 8900 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 0,43 = 31 \text{ кг.}$$

129. Масса меди короткозамыкающих колец по (9.152)

$$m_{м.к.з} = 8900 q_{к.з} (D - 2\delta - 2n_s - 2d_s) 2\pi = \\ = 8900 \cdot 349,1 \cdot 10^{-6} (90 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 0,27 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-2} - \\ - 2 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2}) 2\pi = 16,9 \text{ кг.}$$

130. Масса стали полюсов по (9.153)

$$m_m = 7800 l'_m k_{с.р} 2p (h_m b_m + 0,8 h_p b_p) = 7800 \cdot 37 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95 \cdot 2 \cdot 6 \times \\ \times (14,8 \cdot 10^{-2} \cdot 10,2 \cdot 10^{-2} + 0,8 \cdot 3,1 \cdot 10^{-2} \cdot 16,5 \cdot 10^{-2}) = 631,3 \text{ кг.}$$

131. Масса стали обода ротора по (9.154)

$$m_j = 7800 l_j \pi (D - 2\delta - 2h_{mp} - h_j) h_j = 7800 \cdot 47 \cdot 10^{-2} \cdot 3,14 \times \\ \times (90 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 0,27 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 17,9 \cdot 10^{-2} - 4,5 \cdot 10^{-2}) 4,5 \cdot 10^{-2} = 254,7 \text{ кг.}$$

132. Полная масса меди по (9.155)

$$m_{м} = m_{м1} + m_{mf} + m_{м.с} + m_{м.кз} = 177,6 + 180 + 31 + 16,9 = 405,5 \text{ кг.}$$

133. Полная масса активной стали по (9.156)

$$m_{ст} = m_{Z1} + m_{a1} + m_{м} + m_j = 312,6 + 504,1 + 631,3 + 254,7 = 1702,7 \text{ кг.}$$

Потери и КПД

134. Основные электрические потери в обмотке статора по (9.159)

$$P_{\Sigma 1} = m I_{f \text{ ном}}^2 r_{1(75)} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 57,1^2 \cdot 0,91 \cdot 10^{-3} = 8,9 \text{ кВт.}$$

135. Потери на возбуждение по (9.161)

$$P_f = (I_{f \text{ ном}}^2 r_{f(75)} + 2 \Delta U_{\text{щ}} I_{f \text{ ном}}) \cdot 10^{-3} =$$

$$= (258^2 \cdot 0,163 + 2 \cdot 1 \cdot 258) \cdot 10^{-3} = 11,36 \text{ кВт.}$$

136. Магнитные потери в ярме статора по (9.162)

$$P_{a1} = k_{da} P_{1/50} B_a^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} m_{a1} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 1,3 \cdot 1,56 \cdot 1,23^2 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} 504,1 \cdot 10^{-3} = 1,55 \text{ кВт.}$$

137. Магнитные потери в зубцах статора по (9.163)

$$P_{Z1} = k_{dZ} P_{1/50} B_Z^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} m_{Z1} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 1,7 \cdot 1,56 \cdot 1,57^2 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} 312,6 = 2,04 \text{ кВт.}$$

138. Механические потери по (9.164)

$$P_{\text{мех}} = 3,68 p \left(\frac{V_p}{40} \right)^3 \sqrt{I_1} = 3,68 \cdot 6 \left(\frac{23,6}{40} \right)^3 \sqrt{0,36} = 2,72 \text{ кВт;}$$

$$V_p = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 500}{60} = 23,6 \text{ м/с.}$$

139. Поверхностные потери в полюсных наконечниках по (9.165)

$$P_{\text{пов}} = 0,5 \cdot 2 p a \tau l_1 k_0 \left(\frac{Z_1 n}{10\,000} \right)^{1,5} (B_0 I_{Z1} \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,5 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 0,7 \cdot 23,6 \cdot 10^{-2} \cdot 36 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \left(\frac{90 \cdot 500}{10\,000} \right)^{1,5} \times$$

$$\times (0,215 \cdot 3,14 \cdot 10^{-2} \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-3} = 0,97 \text{ кВт,}$$

где

$$B_0 = B_{\delta 0} (k_{\delta 1} - 1) = 0,86 (1,25 - 1) = 0,215.$$

140. Добавочные потери при нагрузке

$$P_{\text{доб}} = 0,005 P_{\text{ном}} = 0,005 \cdot 533 = 2,67 \text{ кВт},$$

где

$$\begin{aligned} P_{\text{ном}} &= \sqrt{3} V_{\text{ном}} I_{\text{ном.ф}} \cos \varphi_{\text{ном}} \cdot 10^{-3} = \\ &= \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 57,1 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} = 533 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

141. Общие потери при номинальной нагрузке по (9.166)

$$\begin{aligned} \Sigma P &= P_{\text{э1}} + P_f + P_{a1} + P_{Z1} + P_{\text{мех}} + P_{\text{пов}} + P_{\text{доб}} = \\ &= 8,9 + 11,36 + 1,55 + 2,04 + 2,72 + 0,97 + 2,67 = 30,21 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

142. Коэффициент полезного действия по (9.168)

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_{\text{ном}}} = 1 - \frac{30,21}{533} = 0,94.$$

Повышение температуры обмотки статора

143. Удельный тепловой поток на 1 м^2 внутренней поверхности статора по (9.169)

$$\begin{aligned} q_c &= \frac{\left(P_{\text{э1}} \frac{l_1}{l_{\text{ср } 1/2}} + P_{\text{доб}} + P_{a1} + P_{Z1} \right) \cdot 10^3}{\pi D l_1} = \\ &= \frac{\left(8,9 \frac{0,36}{1,49/2} + 2,67 + 1,55 + 2,04 \right) \cdot 10^3}{3,14 \cdot 0,9 \cdot 36 \cdot 10^{-2}} = 10 \, 380 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

144. Превышение температуры внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха по (9.170)

$$\vartheta_{\text{пов.с}} = \frac{q_c}{\alpha(1 + 0,1 V_p)} = \frac{10 \, 380}{80(1 + 0,1 \cdot 23,6)} = 38,6^\circ \text{C}.$$

145. Плотность теплового потока с внешней поверхности лобовых частей

$$q_{\text{л}} = \frac{AJ}{\gamma \vartheta} \frac{l_{Z1}}{l_1} = \frac{440 \cdot 10^2 \cdot 4,6 \cdot 10^6}{46 \cdot 10^6} \frac{3,14 \cdot 10^{-2}}{16,26 \cdot 10^{-2}} = 849,7 \text{ Вт/м}^2.$$

Удельная проводимость меди при 75°C $\gamma_{\vartheta} = 46 \cdot 10^6 \text{ См/м}$; периметр паза (без учета клина) по рис. 9.44 $l_1 = 16,26 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

146. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха по (9.172)

$$\Delta \vartheta_{\text{л}} = \frac{q_{\text{л}}}{13,3 (1 + 0,07 \nu_p)} = \frac{849,7}{13,3 (1 + 0,07 \cdot 23,6)} = 24,1 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

147. Перепад температуры в пазовой изоляции обмотки статора (см. п. 30)

$$\Delta \vartheta_{\text{из}} = 11 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

148. Среднее превышение температуры обмотки статора по (9.173)

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_{\text{об.с}} &= \frac{(\Delta \vartheta_{\text{из}} + \Delta \vartheta_{\text{пов.с}}) l_1 + (\Delta \vartheta_{\text{из}} + \Delta \vartheta_{\text{л}}) l_{\text{л}}}{l_1 + l_{\text{л}}} = \\ &= \frac{(11 + 38,6) 0,36 + (11 + 24,1) 0,385}{1,49/2} = 42,1 \text{ }^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Характеристики двигателя

149. Статическая перегружаемость по (9.176)

$$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{E'_{0*}}{x_{d*} \cos \varphi_{\text{ном}}} k_{\text{р.с}} = \frac{2,7}{1,317 \cdot 0,9} 1,02 = 2,32.$$

При МДС обмотки возбуждения $F_{f_{\text{ном}*}} = 2,12$ по продолжению прямой части характеристики холостого хода находим $E'_{0*} = 2,7$. По рис. 9.43 при

$$\frac{x_{d*} - x_{q*}}{E'_{0*} x_{q*}} = \frac{1,317 - 0,828}{2,7 \cdot 0,828} = 0,22$$

находим $k_{\text{р.с}} = 1,02$.

150. Угловая характеристика $M_* = f(\theta)$ по (9.174)

$$\begin{aligned} M_* &= \frac{E'_{0*}}{x_{d*}} \sin \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \sin 2\theta = \\ &= \frac{2,7}{1,317} \sin \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,828} - \frac{1}{1,317} \right) \sin 2\theta = \\ &= 2,05 \sin \theta + 0,224 \sin 2\theta. \end{aligned}$$

Построенная по этому уравнению характеристика дана на рис. 9.50.

151. U-образные характеристики $I_* = f(I_{f*})$ построены по векторным диаграммам для трех значений мощности $P_{1*} = 0,9; 0,5$ и $0,2$ (за базовое значение мощности принята мощность

$$S_{\text{ном}} = m U_{\text{ном.ф}} I_{\text{ном.ф}} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 3468 \cdot 57,1 \cdot 10^{-3} = 593 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

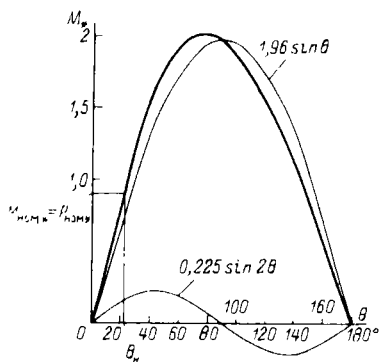


Рис. 9.50. Угловая характеристика

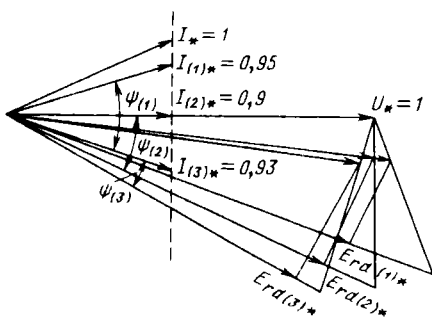


Рис. 9.51. Векторные диаграммы (к построению U-образных характеристик)

за базовое значение тока якоря принят номинальный ток $I_{\text{ном.ф}} = 57,1 \text{ А}$.

При $P_{1\text{ном}} (P_{1* \text{ном}} = \cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9)$ векторные диаграммы для трех значений тока $I_{(1)*} = 0,95$, $I_{(2)*} = 0,9$ и $I_{(3)*} = 0,93$ представлены на рис. 9.51.

Расчетные значения, необходимые для построения векторных диаграмм и определения тока возбуждения, сведены в табл. 9.18 (в относительных единицах).

Ток возбуждения I_{f*} , соответствующий номинальному току якоря при $P_{1\text{ном}}$, был определен раньше (по рис. 9.49). Для других значений мощности U-образные характеристики строятся аналогично. Характеристики приведены на рис. 9.52.

152. Рабочие характеристики I , P , M , $\cos \varphi$, $\eta = f(P_2)$ при $I_{f\text{ном}*} = 2,12$ даны на рис. 9.53.

Из рис. 9.52 при $I_{f\text{ном}}$ находим токи якоря: для $P_{1\text{ном}} = 0,9$ (535 кВт) ток $I_* = 1$ (57,1 А), для $P_{1*} = 0,5$ (297 кВт) ток $I_* = 0,82$ (47 А) и для $P_{1*} = 0,2$ (119 кВт) ток $I_* = 0,7$ (40 А). Расчет рабочих характеристик приведен в

табл. 9.19. При расчете потерь ΣP пересчитываются электрические потери в обмотке статора и добавочные потери (пропорционально I^2). Остальные потери принимаются неизменными.

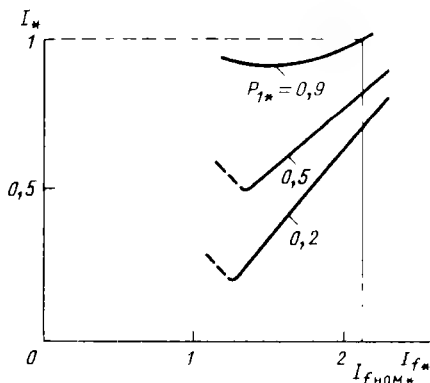


Рис. 9.52. U-образные характеристики

Таблица 9.18

I_*	$E_{\delta*}$	$\frac{F_{\delta Z a}}{F_{\delta}}$	$\tilde{K}$	$\tilde{\kappa}_d$	$\tilde{\kappa}_q$	$\kappa_q k_{ad} F_{a*}$	$\frac{E_{aq*}}{\cos \psi}$	E_{rd*}
0,95	1,05	1,35	0,0024	0,935	0,67	0,30	0,45	1
0,9	1,02	1,25	0,0022	0,94	0,74	0,32	0,47	0,93
0,93	0,98	1,2	0,0021	0,945	0,76	0,34	0,5	0,9

F_{rd*}	ψ	F''_{ad*}	$F''_{ad*} + F_{rd*}$	$\Phi_{\sigma*}$	$\Phi_{rd*} + \Phi_{\sigma*}$	F_{mj*}	$F_{f*} = I_f$
0,80	37	0,619	1,479	0,35	1,35	0,35	1,829
0,72	25	0,51	1,23	0,3	1,23	0,25	1,48
0,64	17	0,42	1,06	0,25	1,15	0,22	1,28

Таблица 9.19

P_{1*}	$P_1, \text{кВт}$	I_{1*}	$I_1, \text{А}$	$\cos \varphi = \frac{P_1}{m U_{\text{ном.}} \Phi I_1}$	$P_{31}, \text{кВт}$	$P_{\text{доб.}}, \text{кВт}$	$\Sigma P, \text{кВт}$	$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$	$P_2 = P_1 - \Sigma P, \text{кВт}$	$P_2 \frac{P_2}{\eta_{\text{ном}}}, \text{Н} \cdot \text{м}$
0,9	535	1	57,1	0,9	8,9	2,67	30,21	0,94	504,79	9641
0,5	297	0,82	47	0,61	6,03	1,81	26,48	0,91	270,52	5167
0,2	119	0,7	40	0,285	4,36	1,31	24,31	0,8	94,69	1808,5

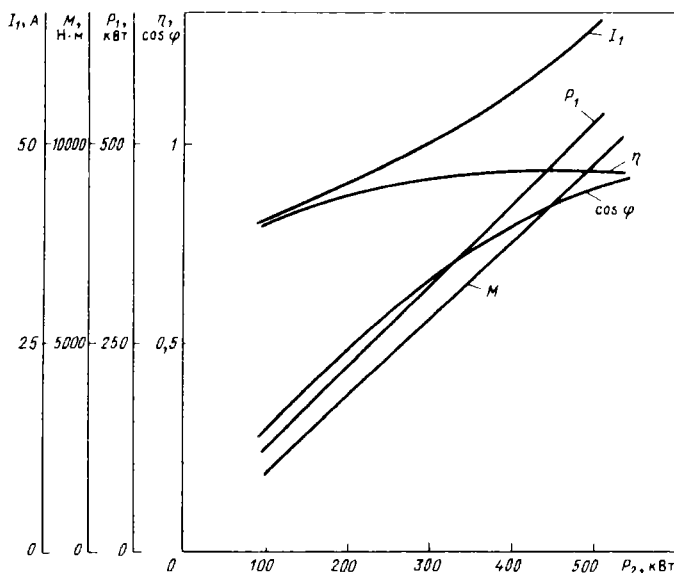


Рис. 9.53. Рабочие характеристики двигателя при $I_{f \text{ ном}}$

153. Пусковые характеристики. Ранее для пусковой обмотки были выбраны круглые медные стержни. Проведенный расчет пусковых характеристик показал, что в этом случае получается низкий пусковой момент ($M_{\text{п*}} = 0,61$). В целях повышения пускового момента заменяем четыре медных стержня из шести на латунные того же размера. Проведем пересчет активных сопротивлений пусковой обмотки.

Активное сопротивление пусковой обмотки по продольной оси по (9.136)

$$r_{kd*} = \frac{2,16}{10^8} \frac{F_{a \text{ ном}}}{f \Phi_6} \frac{1}{1 - k_B} \left[\frac{c'_c c''_0 l_c}{(c''_c N'_c + c'_c N''_c) q_c} + \frac{c_{к.3} \tau C_d}{q_{к.3} N_c} \right] = \frac{2,16}{10^8} \frac{4250}{50 \cdot 0,0454} \frac{1}{1 - 0,4} \left[\frac{1 \cdot 4 \cdot 43 \cdot 10^{-2}}{(4 \cdot 2 + 1 \cdot 4) \cdot 113 \cdot 10^{-6}} + \frac{1 \cdot 23,6 \cdot 10^{-2} \cdot 1}{349,1 \cdot 10^{-6} \cdot 6} \right] = 0,092.$$

где $c'_c = 1$, $c''_c = 4$.

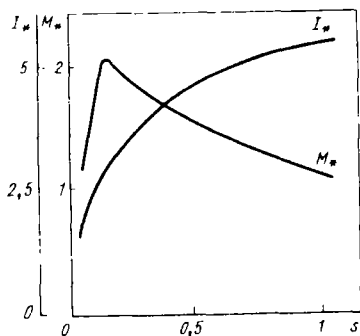
Активное сопротивление пусковой обмотки по поперечной оси по (9.137)

Таблица 9.20

Параметр	Скольжение s				
	1	0,5	0,2	0,1	0,05
$\underline{Y}_{fc} = \frac{1}{r'_{f/s} + jx_{of}} = \frac{r'_{f/s} - jx_{of}}{(r'_{f/s})^2 + x_{of}^2}$	$0,382 - j 3,15$	$0,76 - j 3,13$	$1,42 - j 2,34$	$1,59 - j 1,31$	$1,12 - j 0,46$
$\underline{Y}_{kds} = \frac{1}{r_{kd/s} + jx_{kd}} = \frac{r_{kd/s} - jx_{kd}}{(r_{kd/s})^2 + x_{kd}^2}$	$3,75 - j 5,16$	$3,68 - j 2,52$	$2,03 - j 0,67$	$1,06 - j 0,145$	$0,54 - j 0,037$
$\underline{Y}'_{ds} = \frac{1}{jx_{ad}} + \underline{Y}_{fs} + \underline{Y}_{kds}$	$4,13 - j 9,15$	$4,44 - j 6,49$	$3,45 - j 3,74$	$2,65 - j 2,295$	$1,66 - j 1,34$
$\underline{Z}'_{ds} = \frac{1}{Y'_{ds}}$	$0,041 + j 0,09$	$0,07 + j 0,105$	$0,13 + j 0,14$	$0,22 + j 0,187$	$0,36 + j 0,29$
$\underline{Z}_{ds} = jx_{\sigma} + \underline{Z}'_{ds}$	$0,041 + j 0,22$	$0,07 + j 0,235$	$0,13 + j 0,27$	$0,22 + j 0,317$	$0,36 + j 0,42$
$\frac{1}{\underline{Z}_{ds}}$	$1,02 - j 5,5$	$1,17 - j 3,92$	$1,45 - j 3$	$1,49 - j 2,14$	$1,2 - j 1,4$
$\underline{Y}'_{kqs} = \frac{1}{r_{kq/s} + jx_{kq}} = \frac{r_{kq/s} - jx_{kq}}{(r_{kq/s})^2 + x_{kq}^2}$	$8 - j 12,34$	$8,49 - j 6,54$	$4,94 - j 1,52$	$2,16 - j 0,33$	$1,34 - j 0,103$

Параметр	Скewление s				
	1	0,5	0,2	0,1	0,05
$\underline{Y}' = \frac{1}{j x_{aq}} + \frac{Y_{kqs}}{j}$	$8 - j 13,76$	$8,49 - j 7,98$	$4,94 - j 2,96$	$2,16 - j 1,77$	$1,34 - j 1,54$
$\underline{Z}'_{qs} = \frac{1}{Y'_{qs}}$	$0,0316 + j 0,0543$	$0,0625 + j 0,058$	$0,185 + j 0,11$	$0,28 + j 0,23$	$0,32 + j 0,37$
$\underline{Z}_{qs} = j x_{\sigma} + \underline{Z}'_{qs}$	$0,0316 + j 0,1843$	$0,0625 + j 0,188$	$0,185 + j 0,24$	$0,28 + j 0,36$	$0,32 + j 0,5$
$\frac{1}{\underline{Z}_{qs}}$	$0,9 - j 5,27$	$1,6 - j 4,82$	$2 - j 2,6$	$1,35 - j 1,73$	$0,9 - j 1,43$
$\underline{I}' = \left(\frac{1}{\underline{Z}_{qs}} + \frac{1}{\underline{Z}_{ds}} \right) \Bigg/ 2 = \underline{I}'_a - j \underline{I}'_p$	$0,96 - j 5,385$	$1,385 - j 4,37$	$1,73 - j 2,8$	$1,42 - j 1,93$	$1,05 - j 1,41$
$\underline{I}'' = \left(\frac{1}{\underline{Z}_{qs}} - \frac{1}{\underline{Z}_{ds}} \right) \Bigg/ 2 = \underline{I}''_a - j \underline{I}''_p$	$-0,03 - j 0,115$	$0,107 - j 0,23$	$0,14 + j 0,1$	$-0,035 + j 0,1$	$-0,075 - j 0,005$
$\underline{I}'$	5,47	4,65	3,3	2,4	1,76
$\underline{I}''$	0,119	0,253	0,172	0,105	0,0754
$I = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2}$	5,48	4,67	3,31	2,4	1,76
$M = \underline{I}'_a / \cos \varphi_{\text{ном}}$	1,07	1,54	1,92	1,58	1,17

Рис. 9.54. Пусковые характеристики



$$r_{kq*} = \frac{2,16}{10^8} \frac{F_{aном}}{f\Phi_6} \frac{1}{1+k_B} \times$$

$$\times \left[\frac{c'_c c''_c l_c}{(c''_c N'_c + c'_c N''_c) q_c} + \frac{c_{к.3} \tau c q}{q_{к.3} N_c} \right] =$$

$$= \frac{2,16}{10^8} \frac{4250}{50 \cdot 0,0454} \frac{1}{1+0,4} \left[\frac{1 \cdot 4 \cdot 43 \cdot 10^{-1}}{(4 \cdot 2 + 1 \cdot 4) \cdot 113 \cdot 10^{-5}} + \right.$$

$$\left. + \frac{1 \cdot 23 \cdot 6 \cdot 10^{-2} \cdot 1,7}{349,1 \cdot 10^{-6} \cdot 6} \right] = 0,037.$$

Параметры (в относительных единицах), необходимые для расчета пусковых характеристик,

$$r'_{f*} = 0,038; \quad x_{\sigma f*} = 0,313; \quad x_{kd*} = 0,126;$$

$$x_{kq*} = 0,057; \quad r_{kd*} = 0,092; \quad r_{kq*} = 0,037;$$

$$x_{\sigma*} = 0,13; \quad x_{ad*} = 1,187; \quad x_{aq*} = 0,697.$$

Расчет пусковых характеристик сведен в табл. 9.20. По данным этой таблицы на рис. 9.54 построены характеристики.

Начальный пусковой момент $M_{п*} = 1,07$.

Начальный пусковой ток $I_{п*} = 5,48$.

Контрольные вопросы

1. Как зависит активный объем синхронной машины от выбранных значений индукции B_δ и линейной нагрузки? Что ограничивает предельные значения A и B_δ ?
2. Какие типы обмоток применяются для статоров синхронных машин?
3. Какие противоречивые обстоятельства следует учитывать при выборе числа зубцов статора?
4. Когда и как осуществляется сегментировка магнитопровода статора?
5. Как выбираются и как укладываются в пазу проводники обмотки статора? Как осуществляется их витковая изоляция?
6. Как выбирается воздушный зазор в синхронных машинах? Почему в явнополюсных машинах воздушный зазор под краями полюса берут большим, чем под серединой?

7. Для какой цели и где располагается демпферная (пусковая) обмотка? Назовите разновидности демпферных (пусковых) обмоток и требования к выбору их стержней (зубцов).

8. Укажите возможные значения магнитной индукции в различных участках магнитопровода синхронной машины.

9. Какое влияние на магнитное поле возбуждения оказывают продольная и поперечная реакции якоря?

10. Как определяется МДС обмотки возбуждения при нагрузке машины?

11. Почему напряжение для питания обмотки возбуждения выбирается низким?

12. Как выбираются и как укладываются на полюсе проводники обмотки возбуждения?

13. Как изменяются внешние характеристики в зависимости от нагрузки?

14. Как при данной нагрузке на валу синхронного двигателя можно регулировать $\cos \varphi$?

15. Что понимается под статической перегрузаемостью синхронной машины?

16. Какой ток называется ударным током короткого замыкания? Его практическое значение.

17. Что представляют собой и каким скольжениям соответствуют начальный пусковой и входной моменты?

Глава десятая

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

10.1. СЕРИИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машины постоянного тока общего назначения выпускаются серийно. Создание каждой новой серии представляет собой сложную научно-техническую и экономическую задачу, решение которой ведется на основе глубокого анализа тенденций развития электромашиностроения и прогнозов показателей технического уровня разрабатываемых машин, а также принимаются во внимание все достижения в области проектирования и технологии. В серии должны быть учтены требования международной стандартизации и приняты рациональные принципы увязки мощностей с высотой оси вращения.

Рассмотрим основные этапы развития конструкторской мысли в области машин постоянного тока. Первая общесоюзная серия машин постоянного тока была создана в 1956 г. Она была названа серией П. В этой серии впервые была установлена нормализованная шкала номинальных мощностей и номинальных частот вращения машин. Машины серии П состояли из трех групп конструктивно подобных отрезков серии: машины мощностью от 0,3 до 200 кВт (1–11-й габариты), машины мощностью 200–1400 кВт (12–17-й габариты), машины мощностью свыше 1400 кВт (18–26-й габариты).

Габарит машины определяется диаметром якоря, который нормализован. Для каждого габарита устанавливаются две длины сердечника. Исполнение двигателей единой серии П от 1-го до 11-го габарита по степени защиты соответствует IP22, по способу охлаждения – IC01

или IC05. Возбуждение смешанное. На рис. 10.1 приведена типичная для этой серии конструкция электрической машины.

Серия 2П, созданная к 1974 г., приблизительно через 20 лет после создания первой серии П, спроектирована в полном соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК).

Эта серия машин имеет следующие особенности:

принята единая шкала номинальных высот оси вращения машины; установочные размеры машины (рис. 10.2) однозначно увязаны с высотой оси вращения, но не определяются мощностью машины;

для каждой высоты оси вращения приняты три значения размера l_{10} , которым соответствуют три обозначения длины станины; S — для коротких, M — средних и L — длинных машин.

Установочные размеры электрических машин приведены в табл. П6.2 и П6.3. Принятые обозначения размеров: h — высота оси вращения от нижней опорной поверхности лап до оси вала; b_{10} — расстояние между отверстиями под болты в лапах (торцевой вид); l_{10} — расстояние от оси отверстия в лапе машины до упора (запличика) свободного конца вала; d_1 — диаметр основного свободного конца вала; d_{10} — диаметр отверстий под болты в лапах машин. Обозначения размеров указаны согласно ГОСТ 4541-70.

Размеры l_1 и d_1 свободного конца вала не связывают с высотой оси вращения, а выбирают в зависимости от наибольшего длительного вращающего момента двигателя согласно табл. П6.4; размеры шпонки и шпоночных канавок связаны с размерами l_1 и d_1 .

Диаметры крепежных фланцев, регламентированные МЭК, приведены в табл. П6.5, а обозначения размеров — на рис. 10.2.

Двигатели серии 2П имеют следующие степени защиты (по ГОСТ 17494-87):

IP22 — с самовентиляцией (типа 2ПА), независимой вентиляцией от постороннего вентилятора (типа 2ПН);

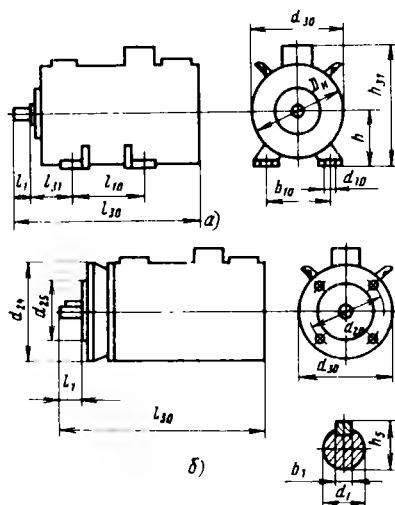


Рис. 10.2. Установочные размеры машины постоянного тока серии 2П:

а — исполнение 1М1001; б — исполнение 1М3101

Таблица 10.1

Форма исполнения	Диапазон габаритов
1М1001, 1М1011, 1М1031	112, 132, 160, 180, 200
1М2101, 1М2111, 1М2131	180 и 200
1М3601, 1М3611, 1М3631	112, 132, 160, 180, 200

IP44 — закрытое исполнение с естественным охлаждением (типа 2ПВ) и закрытое исполнение с наружным обдувом от постороннего вентилятора (типа 2ПО).

Номинальные мощности соответствующих серий приведены в [11].

Формы исполнения двигателей серии 2П в зависимости от габаритов даны в табл. 10.1.

Двигатели серии 2П предназначены для работы как от источников постоянного тока, так и от тиристорных преобразователей. Номинальные напряжения якорной цепи 110, 220, 440, 600 В. Возбуждение независимое, номинальное напряжение возбуждения 110 и 220 В.

Двигатели мощностью до 200 кВт выпускают с номинальными частотами вращения 750, 1000, 1500, 2200, 3000 об/мин. Частота вращения двигателей может регулироваться как изменением напряжения якорной цепи, так и ослаблением поля главных полюсов. Увеличение частоты ослаблением поля допускается до 3500 об/мин при номинальной частоте вращения 1500 об/мин или до 3000 об/мин при номинальной частоте вращения 1000 об/мин и ниже.

Двигатели серии 2П защищенного исполнения типов 2ПА и 2ПН выполняют с изоляцией класса нагревостойкости В, двигатели закрытого исполнения типов 2ПО и 2ПБ — с изоляцией класса нагревостойкости F.

Конструкция двигателя серии 2П приведена на рис. 10.3.

Корпус станины имеет цилиндрическую форму, изготавливается из стали марки Ст3. К корпусу винтами привернуты главные и дополнительные полюсы с обмотками. Главные полюсы набраны из штампованных листов электротехнической стали марок 3411, 3413 толщиной 0,5 или 1 мм. Пакеты листов полюсов скрепляют заклепками. Сердечники дополнительных полюсов также выполняют из электротехнической стали 3411 или другой марки толщиной 0,5 мм или 1 мм. При высотах оси вращения до 132 мм сердечники дополнительных полюсов выполняют из полосовой стали марки Ст3. Обмотка главных полюсов — многослойная из медного провода круглого сечения марки ПЭТВ. Обмотка дополнительных полюсов — из медного провода круглого сечения марки ПЭТВ или прямоугольного провода марки ПСД. Собранные катушки главных и дополнительных полюсов пропитывают в нагревостойких лаках, что обеспечивает их монолитность и влагостойкость, уменьшает внутреннее тепловое сопротивление катушки.

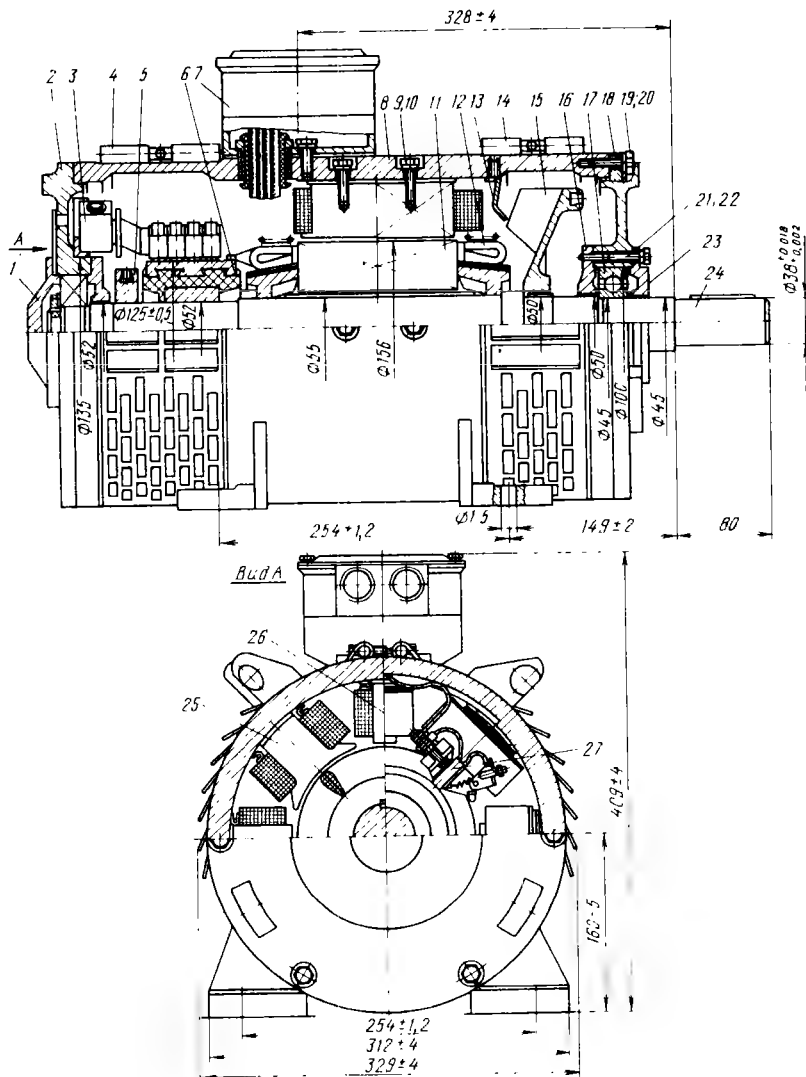
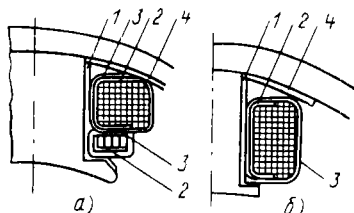


Рис. 10.3. Машина постоянного тока типа 2П-160М:

1, 16, 23 – крышки подшипников; 2 – щит подшипниковый; 3 – траверса; 4 – лента защитная; 5 – балансировочное колесо; 6 – коллектор; 7 – коробка выводов; 8 – станина; 9 – болт; 10 – шайба; 11 – якорь; 12 – обмотка якоря; 13 – диффузор; 14 – защитная лента; 15 – вентилятор; 17 – шарикоподшипник; 18 – подшипниковый щит; 19 – болт М10; 20 – шайба М10; 21 – болт М6; 22 – шайба М6; 24 – вал; 25 – главный полюс; 26 – дополнительный полюс; 27 – щетки

Таблица 10.2. Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока ($h = 80 \div 200$ мм, напряжение до 600 В)

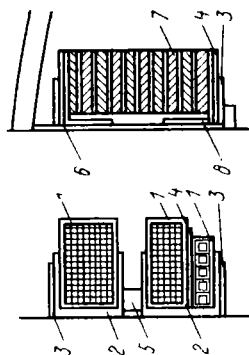


Позиция на рис.	Назначение	Материал			Число слоев	
		Наименование, марка				Толщина, мм
		Класс нагревостойкости				
		В	Г	Н		
1	Изоляция сердечника (напыление)	Эпоксидная смола			1	—
2	Изоляция катушки	Лакоткансельюдопласт			0,25	1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ ГИП-ЛСП-ЛСЛ ГИК-ЛСК-ЛСЛ				
3	То же	Стеклоянная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста
4	Рамка	Стеклотекстолит			0,5	1
		СТ	СТЭФ	СТК		

Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов приведена в табл. 10.2-10.3. Пакет якоря набирается из штампованных изолированных лаком листов электротехнической стали марок 2211, 2312, 2411, 3413 и др. толщиной 0,5 мм, напрессовывается непосредственно на вал и закрепляется между двумя нажимными кольцами, являющимися одновременно обмоткодержателями для лобовых частей обмотки якоря.

В пазы сердечника якоря укладывают обмотку. При диаметрах якоря до 200 мм пазы выполняют полузакрытыми овальной формы, зубцы с параллельными стенками. Обмотка якоря в этих случаях – всыпная из эмалированных медных проводников круглого сечения, образующих мягкие секции, которые легко можно уложить в пазы через сравнительно узкие шлицы.

Таблица 10.3. Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока ($h = 225 \div 315$ мм, напряжение до 600 В)



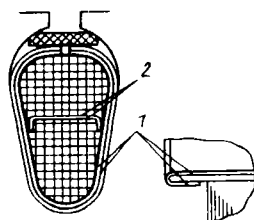
Позиция на рис.	Назначение	Материал		Число слоев				
		Наименование, марка	Толщина, мм					
				Класс нагревостойкости				
				В	Ф	Н	В	Ф, Н
1	Изоляция катушки	Стеклянная лента ЛЭС		0,1				
2	Каркас	Стеклолакоткань		2				
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ				
3	Рамка	Сталь Ст3		1,5				

4	Стеклотекстолит			1,5	1
	СТ	СТЭФ	СТК		
5	Обода	Сталь Ст3		8-10	1
6	Изоляция сердечника	Слюдапластофоллий ИФГ-Б	Синтофоллий F	0,15	0,16
			Синтофоллий Н		7,5
7	Прокладка между- витковая	Асбестовая бумага	Фенилоновая бумага 0,2 мм	0,3	0,2 × 2
					1
8	Изоляция углов	Стекланная лента ЛЭС		0,1	1 вполнахле- ста

В серийных машинах мощностью более 30 кВт обмотку якоря выполняют из прямоугольных обмоточных проводников в виде формованных жестких секций. Все секции, принадлежащие одной катушке, изолируют общей пазовой изоляцией и укладывают в пазы прямоугольной формы, что обеспечивает хорошее использование площади паза и снижает трудоемкость обмоточных работ. Пазовую изоляцию обмоток с мягкими и жесткими секциями выполняют согласно данным в табл. 10.4–10.6.

Обмоткодержатели крепят следующим образом: один упирается в уступ на валу, а другой запирается кольцом, насаженным на вал по горячей посадке. Вал из стали марки 45 имеет ступенчатую форму для раздельной посадки на него сердечника якоря, коллектора и вентилятора.

Таблица 10.4. Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы овальные полузакрытые, обмотка двухслойная всящая из круглого эмалированного провода, напряжение до 600 В)



Высота оси вращения, мм	Позиция на рис.	Материал			Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
		Наименование, марка		Толщина, мм		
		Класс нагревостойкости				
		В	Ф			
Пленкостеклопласт						
80-112	1	Изофлекс	Имидофлекс	0,35	1	0,35
	2	"	"	0,35	1	0,35
Пленкостеклопласт						
132-200	1	Изофлекс	Имидофлекс	0,25	2	0,5
	2	"	"	0,25	2	0,5

Примечание. Прокладку между катушками в лобовых частях обмотки выполняют из изофлекса.

Коллектор состоит из коллекторных пластин, изолированных друг от друга слюдяными пластинами, являющимися межламельной изоляцией. При наружном диаметре коллектора до 250 мм коллекторные пластины закрепляют пластмассой, которую впрессовывают во внутреннее отверстие между пластинами и коллекторной втулкой, предназначенной для посадки коллектора на вал. В качестве армирующей пластмассы используют пластмассу АГ-4С или К6.

Концы обмоток якоря впаивают в петушки коллекторных пластин. Траверса щеткодержателей крепится с помощью болтов к подшипниковому щиту со стороны коллектора. Щеткодержатели изолированы от подшипниковых щитов текстолитовыми кольцами.

Аксиальную принудительную вентиляцию двигателя осуществляют при помощи литого вентилятора, насаженного на вал со стороны привода. Воздух забирается через жалюзи, выполненные в защитной ленте со стороны коллектора, и выбрасывается через отверстия в защитной ленте со стороны привода (выходного вала). Для рационального распределения охлаждающего воздуха над активными частями машины предусмотрен диффузор.

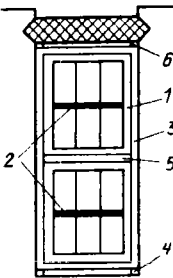
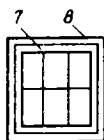
Со стороны коллектора на валу предусмотрено балансировочное кольцо. В подшипниковых щитах со стороны привода и со стороны коллектора установлены шариковые или роликовые подшипники. Концы обмоток якоря и возбуждения выводят к болтам панели, размещенной в коробке выводов.

В конце 70-х годов было начато проектирование и в 1984 г. завершено освоение новой серии 4П двигателей постоянного тока, на базе которых создаются регулируемые электроприводы с высокими динамическими и эксплуатационными показателями для нужд станкостроения и других областей машиностроения. Двигатели серии 4П имеют диапазон регулирования частоты вращения 1 : 5 при регулировании магнитным потоком двигателя и 1 : 1000 при тиристорном регулировании напряжения в цепи якоря [13, 23].

Конструктивно эти двигатели выполнены закрытыми, со степенью защиты IP44, с полностью шихтованным магнитопроводом статора, запрессованным в круглый чугунный или алюминиевый корпус. Способ охлаждения — IC0041 (без вентиляции) или IC0141 с поверхностным охлаждением посредством вентилятора, установленного на валу двигателя. При прямоугольном сечении пакета статора двигатели выполняют без корпуса, способ охлаждения — IC06 или IC05.

По условиям эксплуатации серия 4П выпускается для нормальных условий, соответствующих ГОСТ 15543-70, и для тяжелых условий эксплуатации, соответствующих их работе в механизмах экскаваторов, буровых установок, в оборудовании металлургического производства, в крановом оборудовании и др. Структура серии 4П приведена в табл. 10.7.

Таблица 10.5. Изоляция обмотки якоря машин постоянного тока (пазы откры

Часть обмотки	Пози- ция на рис.	Материал, марка			Толщина, мм	
		Класс нагревостойкости			В	Е, Н
		В	Е	Н		
	1	Слюдапласто- фолий ИФГ-Б	Синто- фолий Е	Синто- фолий Н	0,15	0,16
	2	То же	То же	То же	0,15	0,16
	3	Стеклолакоткань ЛСП			0,15	
	4	Стеклотекстолит				
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	
	6	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	
Допуск на уклад						
Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без вы- бандажной канавки)						
	7	Стеглослюди- нитовая лен- та	Пленка полиимид- ная марки ПМ 0,05 × 3		0,15	
	8	Стекланная лента ЛЭС			0,1	
Общая толщина изоляции катушки в лобовой части						

Закрытые и обдуваемые двигатели мощностью до 10 кВт с регулированием частоты вращения магнитным потоком составляют почти 2/3 общей потребности народного хозяйства в машинах постоянного тока.

Для повышения технологичности конструкции двигателей серии 4П и использования в их производстве технологического оборудования, созданного под серию 4А асинхронных двигателей, магнитопровод статора этих машин унифицирован с пакетом статора асинхронных машин. При такой конструкции магнитопровода статора машин серии 4П обмотка возбуждения укладывается в два паза в пределах полюсной дуги основного потока, а во всех остальных пазах равномерно располагается компенсационная обмотка. Распределение обмоток возбуждения и компенсационной обмотки в пазах магнитопровода статора позволяет обеспечить полную компенсацию реакции якоря не только в режимах номинальной нагрузки, но и при больших кратностях перегрузки по току якоря.

тые, обмотка из прямоугольного провода, $h = 225 \div 315$ мм, напряжение 600 В)

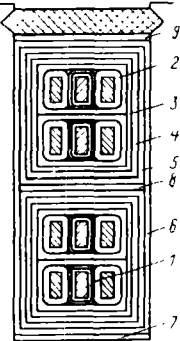
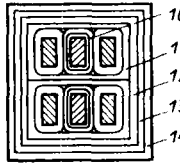
Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции				
Класс нагревостойкости		по ширине	по высоте при w_c			
В	F, H		1	2	3	4
4,5 оборота	3,5 оборота	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2
	0 6			0,3	0,6	0,9
1	1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
ку обмотки		0,3	0,5	0,5	0,5	0,5
соты клина или без высоты		1,7	4,8	5,1	5,4	5,7
1 вполнехлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
То же		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
(без витковой)		1	1	1	1	1

Распределение обмоток по пазам статора одновременно улучшает теплоотдачу обмоток, позволяет увеличить плотность тока в обмотках возбуждения, компенсационной и добавочных полюсов и довести их до уровней, установленных для статорных обмоток асинхронных машин. При применении шихтованного магнитопровода статора машин постоянного тока уменьшается магнитная несимметрия и повышается коммутационная надежность двигателей в стационарных и динамических режимах, улучшаются динамические показатели машины при питании от тиристорных преобразователей напряжения.

Эти двигатели допускают работу без включения в цепь якоря дополнительного сглаживающего реактора. При номинальной мощности допустима пульсация тока до 15%, а при увеличении коэффициента пульсации до 45% мощность двигателя должна быть снижена только на 10%.

На рис. 10.4 показана конструкция двигателя постоянного тока типа 4ПО, в которой детали и узлы максимально унифицированы с конструкциями асинхронных машин. Приняты одинаковыми внешние диа-

Таблица 10.6. Изоляция обмотки якоря двигателя постоянного тока (пазы разрезная с жесткими формованными катушками из провода марки ПСД 500 мм, напряжение до 1000 В)

Часть обмотки	Позиция	Материал			
		Наименование, марка		Толщина, мм	
		Класс нагревостойкости			
		F	H	F	H
	1	Стекланная лента ЛЭС	Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,05
	2	Бумага фенилоновая			0,05
	3	Полиимидная пленка	ПМ		0,05
	4	Бумага фенилоновая			0,05
	5	Стекланная лента ЛЭС			0,1
	6	Бумага фенилоновая			0,2
	7	Секлотекстолит СТЭФ	СТК		0,5
	8	То же	СТК		0,5
	9	"	СТК		0,5
		Допуск на укладку обмотки			
	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина)				
	10	Стекланная лента ЛЭС	Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,05
	11	Бумага фенилоновая			0,5
	12	Полиимидная пленка ПМ			0,05
	13	Бумага фенилоновая			0,05
	14	Стекланная лента ЛЭС			0,1
	Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)				

прямоугольные открытые, обмотки двухслойная петлевая, волновая, лягушачья (класс нагревостойкости F) и ПСДК (класс нагревостойкости H), $h = 355 \div$

Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм				
Класс нагревостойкости		по ширине при u_{II}				по высоте
F	H	2	3	4	5	
1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
3 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	1,2
1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
1		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1		—	—	—	—	0,5
1		—	—	—	—	0,5
1		—	—	—	—	0,5
—		0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
—		2,1	2,1	2,3	2,3	5,8
1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
—		1,2	1,2	1,4	1,4	1,5

Таблица 10.7. Структура двигателей серии 4П

Исполнение	Тип	Высота оси вращения, мм	Номинальный вращающий момент, Н · м	Способ охлаждения	Степень защиты
Закрытые обдуваемые с нормальным регулированием	4ПО	80	2,3 3,5 4,7	IC0141	IP44
		100	5,6 7,1 9,5		
		112	14 19		
		132	25 35		
		160	47		
Закрытые с естественным охлаждением	4ПБ	100	1,2 1,6 2,4	IC0041	IP44
		112	7,1 9,5		
		132	14 19		
		160	25 35		
Широкорегулируемые с принудительной вентиляцией	4ПФ	112	53 71	IC05, IC06	IP23
		132	95 118 140		
		160	190 236 280		
		180	355 475		
		200	560 710		
		225	850 1000		
		250	1250 1500		

Исполнение	Тип	Высота оси вращения, мм	Номинальный вращающий момент, Н · м	Способ охлаждения	Степень защиты
Крупные двигатели для тяжелых условий эксплуатации		280	1700 2120		IP23
		355	3000 3750 4750		
		450	6000 9500 15 000		

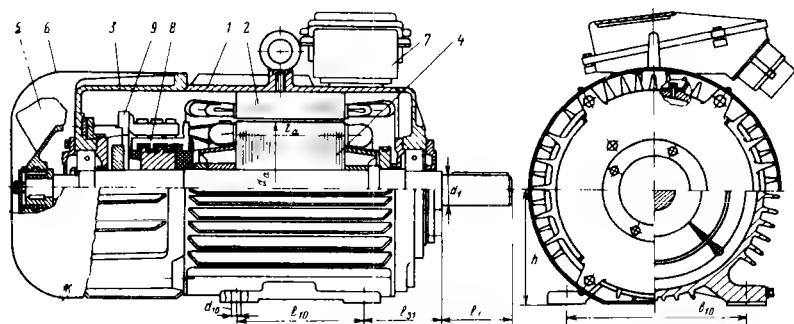


Рис. 10.4. Машина постоянного тока серии 4П:

1 – корпус; 2 – магнитопровод статора; 3 – щит подшипниковый передний; 4 – сердечник якоря; 5 – вентилятор; 6 – кожух; 7 – коробка выводов; 8 – коллектор; 9 – токосъемное устройство

метры пакетов стали статоров и длины пакетов в обеих конструкциях. Подшипниковые щиты на стороне, противоположной коллектору, станины, коробки выводов, вентиляционные и подшипниковые узлы, используемые в конструкциях серии 4А, могут быть применены в двигателе серии 4П. Поэтому операции штамповки листов, сборки пакетов статора и ротора, запрессовки их в станину и на вал осуществляются на оборудовании, предназначенном для производства асинхронных двигателей.

Воздушный зазор в рассматриваемых конструкциях выполняется равномерным, без увеличения его под краями главных полюсов. Зазор также может быть принят равным воздушному зазору асинхронной машины, что позволяет уменьшить ток возбуждения. Исполнение

двигателя по степени защиты IP44 повышает надежность этих двигателей в эксплуатации.

Конструкция изоляции обмоток якоря и статора двигателей серии 4П соответствует изоляции асинхронных машин серии 4А и машин постоянного тока серии 2П. Класс нагревостойкости изоляции обмоток: F — для магнитной системы и H — для якоря.

Сравнение степени использования объема двигателей постоянного тока серии 4П и асинхронных двигателей серии 4А показывает, что мощность двигателя постоянного тока унифицированной конструкции равна приблизительно $2/3$ номинальной мощности асинхронного двигателя серии 4А при той же высоте оси вращения. Однако по сравнению с двигателями серии 2П достигнуто значительное снижение расхода активных материалов на единицу мощности. Например, в диапазоне мощностей от 15 кВт до 20 кВт расход обмоточной меди в двигателях новой серии на 20–30% меньше, чем в двигателях серии 2П [13, 23].

10.2. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Расчет и проектирование электрической машины являются сложной инженерной задачей. Конструктор должен хорошо знать общую теорию электрических машин. Он должен учитывать все требования к конструкции машины, знать современную технологию электромашиностроения, теорию прочности и надежности машин. Если эту задачу решает студент, то он должен уметь использовать опыт проектных и конструкторских организаций, изученный им во время производственной практики. Нужно помнить, что вся конструкторская документация на машину должна быть исполнена в соответствии с требованиями ГОСТ или отраслевых стандартов.

В соответствии с государственными стандартами разработка любого изделия всех отраслей промышленности определяется техническим заданием, в котором устанавливаются основное назначение, технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования, предъявляемые к проектируемому изделию, соответствие его мировому техническому уровню.

В техническом задании на проектируемую машину постоянного тока указываются следующие данные:

номинальная мощность машины, кВт;

номинальное напряжение сети, В;

номинальная частота вращения, об/мин;

род возбуждения;

исполнение по степени защиты, способу монтажа и способу охлаждения;

условия эксплуатации при воздействии климатических и механических факторов;

номинальный режим работы и допускаемое превышение температуры, класс изоляции по нагревостойкости;

диапазон регулирования частоты вращения путем изменения напряжения сети, ослабления поля главных полюсов;

массогабаритные характеристики;

требования к коммутации;

дополнительные требования, например показатели надежности и долговечности, значения КПД при номинальном режиме и определенном коэффициенте нагрузки и др.

При задании указанных величин вся последовательность расчета и проектирования машины постоянного тока соответствует установленной практикой электромашиностроения принципам проектирования машин общего назначения. На основе электромагнитного теплового и вентиляционного расчетов может быть спроектирована машина, соответствующая специальным требованиям к конструкции и ее характеристикам.

Курсовой и дипломный проекты следует рассматривать как творческое индивидуальное задание. При выполнении этих работ студент должен показать умение мыслить творчески, изобретательно и неординарно решать инженерные задачи, активно использовать полученные им в вузе теоретические знания, правильно разрешать возникающие противоречия и выбирать лучший вариант, удовлетворяющий всем требованиям технического задания.

10.3. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

По формуле "машинной постоянной" (1.1), устанавливающей связь между размерами машины и электромагнитными нагрузками, определяют произведение $D^2 l$, где D — диаметр якоря и l — длина якоря. При расчете $D^2 l$ предварительно выбирают индукцию в воздушном зазоре B_g и линейную нагрузку A . Для определения главных размеров D и l задаются либо отношением $\lambda = l/D$, либо одним из размеров. При проектировании машин первых серий и их модификаций не устанавливалась связь между диаметром машины и установочными размерами, поэтому выбор главных размеров машины определялся на основании рекомендаций, устанавливающих экономически целесообразные значения отношения $\lambda = l/D$. Полученные при расчете диаметры якоря округлялись до ближайшего стандартного значения, выбранного по шкале диаметров якорей серийных машин.

Машины постоянного тока современных серий имеют единую шкалу высот оси вращения. При заданной высоте оси вращения h внешний диаметр корпуса машины постоянного тока не может превышать размер $2h$. Обычно этот диаметр должен быть не более $D_{\text{вн}} = 2h - (8 \div 10) \cdot 10^{-3}$ м.

По данным многих типов и конструкций машин постоянного тока относительная радиальная высота магнитной системы $(D_{\text{вн}} - D)/D =$

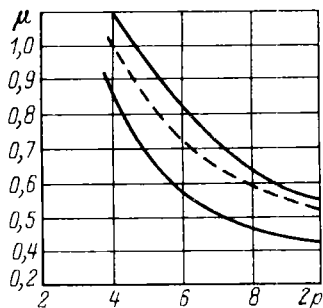


Рис. 10.5. К определению отношения внешнего диаметра машины к диаметру якоря

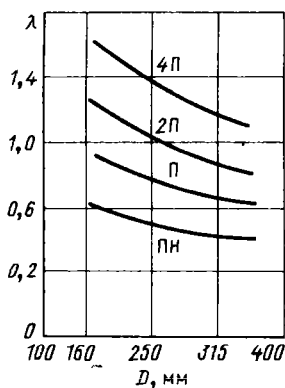


Рис. 10.6. Зависимость λ от диаметра якоря для машин различных серий

μ является функцией числа полюсов. Область значений этой функции для различных чисел полюсов приведена на рис. 10.5. Пользуясь рис. 10.1 и рис. 10.5, можно определить предварительное значение диаметра якоря. Значение D необходимо уточнить после составления эскиза магнитной системы и межполюсного окна. Далее по (1.1) и уточненному значению D устанавливают расчетную длину якоря l .

Так как традиционный способ определения главных размеров машины через отношение длины якоря к его диаметру более удобен, на рис. 10.6 приведены зависимости λ от диаметра якоря для машин постоянного тока серий 4П, 2П, П и ПН, полученные путем расчета указанного показателя реальных машин. При выборе отношения λ необходимо иметь в виду, что с увеличением длины машины уменьшается относительная длина лобовых частей, возрастает КПД, снижается момент инерции якоря, но при этом ухудшаются условия охлаждения и коммутации машины.

Электромагнитная мощность. В (1.1) в качестве расчетной принята электромагнитная мощность P' . Однако истинное значение электромагнитной мощности можно определить только после полного расчета электрической машины на этапе расчета ее характеристик. Поэтому мощность P' определяют по номинальной (заданной) мощности $P_{\text{ном}}$ и предварительно принятому значению КПД.

Зависимость КПД от номинальной мощности для машин общего назначения приведена на рис. 10.7.

Для генераторов расчетная мощность принимается равной:

$$P' = k_T P_{\text{ном}}; \quad (10.1)$$

для двигателей

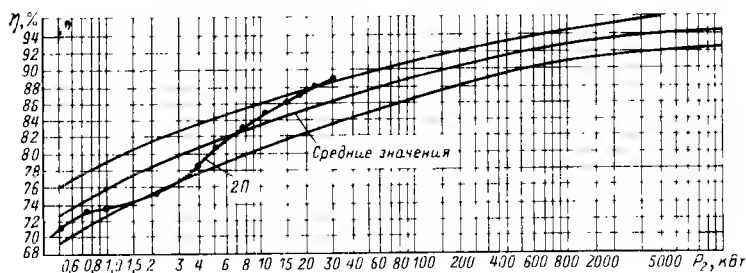


Рис. 10.7. Зависимость КПД машин постоянного тока от мощности машины

$$P' = k_d P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} \quad (10.2)$$

Значения коэффициентов k_r и k_d приведены в табл. 10.8, там же даны значения коэффициента k_B , определяющего отношения тока возбуждения к току якоря.

Для электрических машин общего назначения можно определить электромагнитную мощность по формуле

$$P' = P_{\text{ном}} \frac{1 + \eta_{\text{ном}}}{2\eta_{\text{ном}}}, \quad (10.2a)$$

где $\eta_{\text{ном}}$ — КПД (рис. 10.7).

Таблица 10.8. Значения коэффициентов k_r , k_d , k_B

Мощность машины, кВт	k_r	k_d	k_B
Менее 1	1,4–1,15	0,65–0,85	0,2–0,08
1–10	1,2–1,1	0,82–0,95	0,1–0,025
10–100	1,15–1,06	0,85–0,97	0,035–0,02
100–1000	1,06–1,03	0,93–0,98	0,02–0,005

Выбор коэффициента полюсного перекрытия. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия a_δ , как следует из (1.1), оказывает влияние на степень использования машины: с увеличением a_δ возрастает использование машины. Однако при чрезмерном увеличении a_δ уменьшается ширина межполюсного окна ($\tau - b_p$), возрастает поток рассеяния главных полюсов, увеличивается проникновение поля главных полюсов в зону коммутации, уменьшается коммутационная надежность машины.

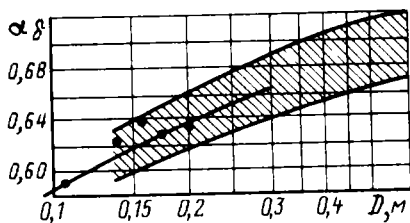


Рис. 10.8. Зависимость $\alpha_\delta = f(D)$

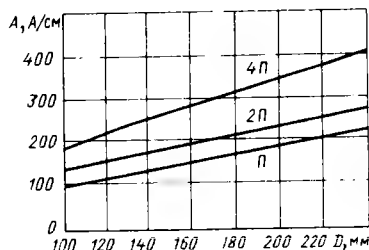


Рис. 10.9. Зависимость линейной нагрузки от диаметра якоря

Для машин общего назначения с добавочными полюсами значение α_δ устанавливается в пределах 0,55–0,72, без добавочных полюсов $\alpha_\delta = 0,6 \div 0,85$.

На рис. 10.8 приведены зоны предельных значений α_δ для машин общего назначения при числе полюсов $2p \geq 4$.

Выбор электромагнитных нагрузок. Согласно (1.1) увеличение электромагнитных нагрузок A и B_δ приводит к улучшению использования объема якоря. Однако с ростом линейной нагрузки A увеличивается нагрев якоря и машины, ухудшается коммутация, с ростом B_δ насыщаются отдельные участки магнитной цепи.

Таким образом, оптимальные значения электромагнитных нагрузок невозможно выбрать на начальном этапе расчета электрической машины. Этот выбор, как правило, основывается на данных, полученных в результате анализа ранее разработанных серий машин постоянного тока или путем расчета и сравнения ряда вариантов.

Рекомендуемые значения A и B_δ для машин общего назначения приведены на рис. 10.9 и 10.10. При выборе линейных нагрузок необходимо учитывать, что для хорошо охлаждаемых машин можно выбрать более высокие значения линейных нагрузок; для тихоходных машин, работающих с перегрузками и частными реверсами, необходимо при-

нимать уменьшенные значения линейных нагрузок. Выбранные значения электромагнитных нагрузок обычно корректируются после расчета ряда вариантов выбора главных размеров, геометрии зубцовой зоны и обмоток.

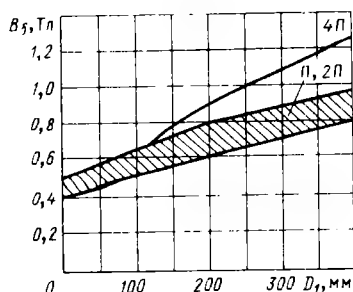


Рис. 10.10. Зависимость индукции в воздушном зазоре от диаметра якоря

10.4. РАСЧЕТ ОБМОТКИ И ПАЗОВ ЯКОРЯ

В § 3.13 даны исходные рекомендации по выбору и расчету обмоток машин постоянного тока. Тип обмотки и число параллельных ветвей определяют, исходя из принятого числа главных полюсов $2p$ и тока параллельной ветви I_a . Число главных полюсов машин постоянного тока общего назначения в зависимости от диаметра можно принимать: $2p=2$ при D до 100 мм и $2p=4$ при $D=112 \div 500$ мм.

Для расчета числа параллельных ветвей определяют предварительное значение тока якоря, А:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для генераторов} \quad I = \frac{P_{\text{ном}}}{U} (1 + k_{\text{в}}); \\ \text{для двигателей} \quad I = \frac{P_{\text{ном}}}{U} (1 - k_{\text{в}}). \end{array} \right\} \quad (10.3)$$

Значения коэффициентов $k_{\text{в}}$ приведены в табл. 10.8.

Исходя из принятого числа главных полюсов $2p$, предварительного значения тока якоря I и допустимого тока параллельной ветви $I_a = 250 \div 300$ А согласно данным § 3.14 принимают тип обмотки. При токах якоря до 600 А выбирают простую волновую обмотку, от 500 до 1400 А – простую петлевую обмотку.

Число проводников обмотки якоря

$$N = (A \pi D 2a) / I. \quad (10.4)$$

Согласно рекомендации § 3.14 и ориентировочным значениям зубцового деления t_{Z1} определяют число пазов якоря:

$$Z = \pi D / t_{Z1}. \quad (10.5)$$

Ориентировочные значения t_{Z1} для различных высот оси вращения следующие:

h , мм	80–200	225–315	355–500
t_{Z1} , мм ...	10–20	15–35	18–40

Число эффективных проводников обмотки в пазу N/Z должно быть в двухслойных обмотках четным числом.

По условиям коммутации пазовый ток $I_{\text{п}} = A t_{Z1}$ не должен превышать 1500–1600 А при $D < 1000$ мм.

Для расчета числа коллекторных пластин K и числа секционных ступеней в пазу $u_{\text{п}}$ целесообразно рассмотреть несколько вариантов выполнения обмотки. Результаты расчета удобно представить в виде таблицы

№ варианта	$\mu_{\text{н}}$	$K = \mu_{\text{н}} Z$	$w_{\text{с}} = \frac{N}{2K}$	$U_{\text{к.ср}} = \frac{2p U_{\text{ном}}}{K}$
1				
2				
.				
.				
.				
n				

При сравнении вариантов следует учесть, что в двигателях с полузакрытыми пазами всыпная обмотка из круглых проводников может иметь дробное число витков секции $w_{\text{с}} = N/2K$, так как в этом случае допускается выполнение секций, расположенных в одном пазу с разным числом витков. Например, в некоторых машинах серии 2П при волновой обмотке с $\mu_{\text{н}} = 3$ число витков в секциях принято равным 1-2-1, 2-1-2, 5-4-5.

При открытых пазах и проводах прямоугольного сечения значения $w_{\text{с}}$ должны округляться до ближайшего целого числа.

Максимальное число коллекторных пластин $K = \mu_{\text{н}} Z$ должно оцениваться по минимально допустимому значению коллекторного деления, которое в зависимости от диаметра коллектора должно быть не менее:

$D_{\text{к}}$, мм	125	140	280	315	500
$t_{\text{к}}$, мм	3	3,5		3,8	

Для серийных машин без компенсационной обмотки допускается $U_{\text{к.ср}}$ до 16 В, для машин с компенсационной обмоткой $U_{\text{к.ср}} \leq 20$ В, для машин малой мощности (до 1 кВт) $U_{\text{к.ср}} \leq 25 \div 30$ В. Для расчета коллекторного деления $t_{\text{к}}$ необходимо выбрать внешний диаметр коллектора $D_{\text{к}}$ из следующего ряда по ГОСТ 19780-81: 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 160, 180, 200, 224, 250, 280, 315, 355, 400, 450 мм.

Диаметр коллектора $D_{\text{к}}$ при открытых пазах якоря должен находиться в пределах

$$D_{\text{к}} = (0,65 \div 0,7) D. \quad (10.6)$$

При полузакрытых пазах якоря и отсутствии петушков на коллекторе

$$D_{\text{к}} = (0,65 \div 0,8) D. \quad (10.7)$$

После выбора варианта обмотки необходимо уточнить линейную нагрузку

$$A = \frac{2u_{\Pi} Z w_c I_a}{\pi D} \quad (10.8)$$

и скорректировать расчетную длину машины.

Поперечное сечение эффективного проводника обмотки якоря, м^2 ,

$$q_a = I 2a / J_a, \quad (10.9)$$

где J_a — плотность тока, А/м^2 .

Плотность тока предварительно выбирают, используя зависимости произведения AJ от класса нагревостойкости изоляции (рис. 10.11), построенные по данным серийных машин постоянного тока.

Для выпных обмоток якоря с полужакрытыми пазами следует выбрать круглый провод марки ПЭТВ при классе нагревостойкости В. При классе нагревостойкости Н могут быть применены провода марки ПСДТК. Диаметр изолированного провода не должен превышать 1,8 мм.

Эффективные проводники выпных обмоток обычно состоят из нескольких элементарных проводников. Число элементарных проводников $n_{эл}$ и сечение элементарного проводника $q_{эл}$ определяют из равенства

$$q_a = n_{эл} q_{эл}, \quad (10.10)$$

где $n_{эл}$ должно быть целым числом.

Сечение и размеры прямоугольных проводников обмотки якоря с открытыми пазами определяют при расчете размеров паза и зубца.

Форма паза и геометрии зубцовой зоны в целом зависят от диаметра якоря, типа и конструкции обмотки.

Наиболее целесообразной с точки зрения технологии обмоточных работ формой паза является открытый паз с параллельными стенками. При прямоугольной форме проводников эти пазы имеют высокий коэффициент заполнения.

Однако при открытых пазах увеличивается коэффициент воздушного зазора, возрастают пульсации магнитного потока и зубцовые гармонические электромагнитного момента. Увеличиваются также поверхностные и пульсационные добавочные потери в магнитной системе.

Области применения полужакрытых и открытых пазов указаны в гл. 3.

При диаметрах якоря до 50 мм для упрощения формы штампа допускается применение пазов круглой формы.

При выбранной форме паза исходной величиной в расчетах геометрии зубцовой зоны является площадь паза, которая должна быть достаточной только для размещения в пазу проводников обмотки якоря, изоляции и крепления.

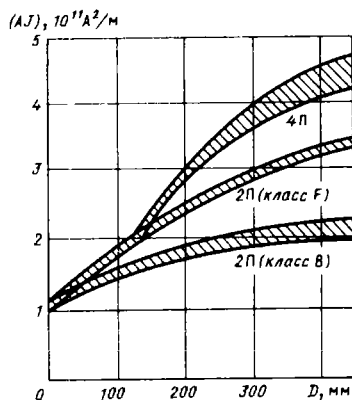


Рис. 10.11. Зависимость произведения AJ от диаметра якоря

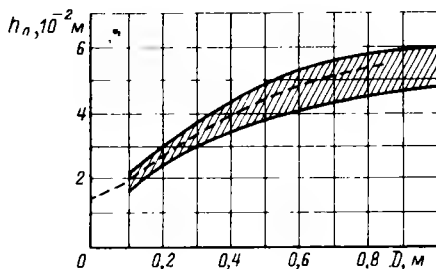


Рис. 10.12. Зависимость высоты h_n от диаметра якоря

Овальные пазы якоря. При овальной форме паза зубцы выполняют с равновеликим по высоте сечением (рис. 10.12). Ширина зубца предварительно

$$b_z = B_{\delta} t_{z1} / (k_c B_z), \quad (10.11)$$

где B_z — допустимое значение индукции в зубцах, Тл; k_c — коэффициент заполнения пакета якоря сталью (см. табл. 8.11).

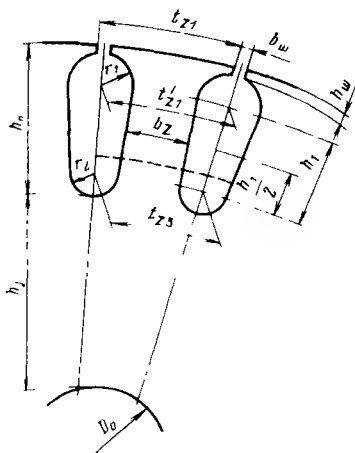
Значения магнитной индукции B_z в зависимости от частоты перемагничивания, степени защиты и способа охлаждения могут быть приняты согласно данным табл. 10.9.

Высоту паза h_n предварительно выбирают согласно рис. 10.13. Предварительно выбранные значения размеров паза уточняют на основании расчетов индукций в соответствующих участках магнитной цепи зубцовой зоны и размещении обмоток в пазах. Одновременно необходимо иметь в виду, что высота ярма якоря h_j (см. рис. 10.12) должна

Таблица 10.9

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция B_z , Тл, при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	25 и ниже
IP22, IC01, IC17, IP44, IC37	1,65–1,85	1,75–1,95	1,85–2,05	1,9–2,1
IP44, IC0141	1,4–1,6	1,5–1,7	1,55–1,75	1,6–1,8
IP44, IC0041	1,3–1,5	1,3–1,6	1,5–1,7	1,55–1,75

Рис. 10.13. Размеры полузакрытых пазов овальной формы



быть более или равной значению $h_{j \min}$, при котором магнитная индукция в спинке якоря является предельно допустимой (табл. 10.10),

Минимальная высота спинки якоря $h_{j \min}$ равна:

$$h_{j \min} = \Phi / (2lk_c) + 2d_k / 3, \quad (10.12)$$

где Φ — магнитный поток в воздушном зазоре, Вб; l — длина пакета якоря, м; d_k — диаметр аксиальных вентиляционных каналов, м.

Обычно магнитопроводы якорей с овальными пазами выполняются без аксиальных каналов, и только в некоторых случаях при высотах оси вращения $h \geq 200$ мм и диаметрах якоря свыше 200 мм выполняется один ряд аксиальных каналов.

При расчете h_n и h_j необходимо задаться значением внутреннего диаметра листов якоря D_0 (см. рис. 10.12). Это значение приближенно определяют по формуле

$$D_0 \approx 27 \sqrt[3]{P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}}}. \quad (10.13)$$

Таблица 10.10

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция B_j , Тл, при частоте перемагничивания, Гц	
	50 100	до 50
IP22, IC01, IP22, IC17, IP44, IC37	1,4	1,45
IP44, IC0141	1,15	1,2
IP43, IC0041	1,05	1,1

Примечание. При числе полюсов $2p = 2$ предельные значения B_j можно увеличить на 0,2 Тл.

Таблица 10.11

h , мм	90	110	112	132	160	180	200
D , мм	90	106	110	132	156	180	200
D_0 , мм	24	28	38	50	55	60	65

Для машин серии 2П внутренний диаметр D_0 можно определить по табл. 10.11.

При выбранной ширине зубца b_Z и установленном значении h_{II} определяют размеры и площадь сечения паза:

высота шлица $h_{ш} \approx 0,5 \div 0,8$ мм;

ширина шлица принимается больше суммы максимального диаметра изолированного проводника и двусторонней толщины изоляции:

большой радиус

$$r_1 = \frac{\pi(D - Zh_{ш}) - Zb_Z}{2(Z + \pi)}; \quad (10.14)$$

меньший радиус

$$r_2 = \frac{\pi(D - 2h_{II}) - Zb_Z}{2(Z - \pi)}; \quad (10.15)$$

расстояние h_1

$$h_1 = h_{II} - h_{ш} - r_1 - r_2; \quad (10.16)$$

площадь паза в штампе

$$S_{II} = \frac{\pi}{2} (r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2) h_1; \quad (10.17)$$

площадь сечения пазовой изоляции

$$S_{из} = b_{из} (2\pi r_1 + \pi r_2 + 2h_1); \quad (10.18)$$

площадь пазового клина и изоляционной прокладки между слоями обмотки

$$S_K = (3 \div 5) r_1; \quad (10.19)$$

площадь поперечного сечения паза, заполненная обмоткой,

$$S_{п.о} = S_{II} - S_{из} - S_K; \quad (10.20)$$

площадь поперечного сечения обмотки, уложенной в один паз,

$$S_0 = \frac{2d_{из}^2 n_{эл} u_{п} w_c}{k_3}, \quad (10.21)$$

где $d_{из}$ — диаметр одного изолированного провода; $n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном эффективном проводнике; w_c — число витков в секции; $u_{п}$ — число секционных сторон в пазу; k_3 — коэффициент заполнения пазы изолированными проводниками: $k_3 = 0,68 \div 0,72$; $b_{из}$ — толщина пазовой изоляции.

Если площадь поперечного сечения пазы $S_{п.о}$ больше площади поперечного сечения обмотки S_0 , то необходимо выбрать проводники большего диаметра и снизить плотность тока J_a обмотки якоря.

Если $S_0 > S_{п.о}$, то требуется увеличить плотность тока и выбрать проводники меньшего сечения, чтобы обеспечить коэффициент заполнения пазы k_3 не более 0,72.

Средняя длина полувитка секций обмотки якоря с овальными пазы и высшими обмотками, м,

$$l_{a\text{ ср}} = l_{л} + l_{п}, \quad (10.22)$$

где $l_{л}$ — длина лобовой части, м; $l_{п}$ — длина якоря, м.

Средняя длина лобовой части:

при $2p = 2$

$$l_{л} = 0,9\tau; \quad (10.23)$$

при $2p = 4$

$$l_{л} = (1,2 \div 1,3)\tau. \quad (10.24)$$

Сопротивление обмотки якоря, Ом,

$$R_a = \rho_{\vartheta} \frac{N l_{a\text{ ср}}}{(2a)^2 q_a}, \quad (10.25)$$

где ρ_{ϑ} — удельное сопротивление меди при расчетной рабочей температуре.

Масса меди, кг,

$$m_{ма} = 8900 l_{a\text{ ср}} N q_a. \quad (10.26)$$

Прямоугольные пазы якоря. При прямоугольной форме пазы (рис. 10.14) предварительно задаются высотой пазы $h_{п}$ (см. рис. 10.13). Ширина зубца в минимальном сечении b_{Z3} (у основания пазы) определяется допустимой индукцией $B_{Z\text{ max}}$, значения которой можно принять по табл. 10.12.

Якоря машин постоянного тока общего назначения с прямоугольными пазы при диаметрах свыше 200 мм имеют аксиальные venti-

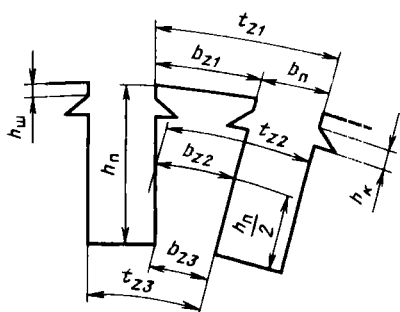


Рис. 10.14. Размеры пазов прямоугольной формы

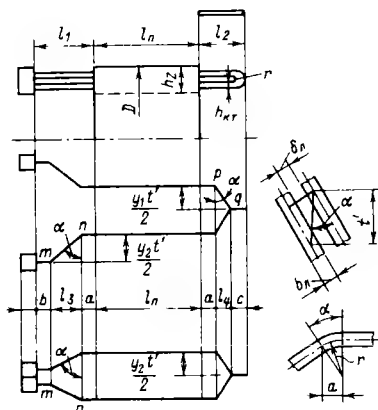


Рис. 10.15. К расчету и проектированию секций обмоток якоря

Таблица 10.12

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция B_{Zmax} , Тл, при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	До 25
IP22, IC01, IC17, IP44, IC37	1,9–2,1	2–2,2	2,1–2,3	2,2–2,4
IP44, IC0141	1,6–1,8	1,7–1,9	1,8–2	1,9–2,1
IP44, IC0041	1,5–1,7	1,6–1,8	1,7–1,9	1,8–2

ляционные каналы. При диаметрах до 300 мм достаточно выполнить один ряд каналов диаметром от 15 до 22 мм при числе каналов от 18 до 25.

При диаметрах от 300 мм до 500 мм выполняют два ряда каналов диаметром от 24 до 34 мм с числом каналов от 24 до 30.

При диаметрах якоря до 500 мм пакет магнитопровода насаживают непосредственно на вал. Внутренний диаметр сердечника в этом случае принимают ориентировочно равным $D_0 \approx 0,3D$ или рассчитывают по формуле (10.13).

Размеры паза h_{π} и b_{π} и спинки якоря h_j уточняют после проверки индукции в спинке якоря B_j , которая не должна превышать предельных значений, приведенных в табл. 10.10.

При креплении обмоток в пазах якоря клиньями (рис. 10.14) высота клина $h_{кл}$ принимается равной приблизительно 4 мм, высота шлица $h_{ш} = 1$ мм.

После выбора размеров паза и зубца определяется максимальная ширина проводника с изоляцией:

$$b_{\text{пр}} = (b_{\text{п}} - b_{\text{из}}) / u_{\text{п}}. \quad (10.27)$$

При скосах пазов на одно или половину зубцового деления расчетную ширину паза в формуле (10.27) необходимо уменьшить на 0,1 мм.

Предельно допустимые значения высоты проводника с изоляцией равны:

$$a_{\text{пр}} = (h_{\text{п}} - h_{\text{из}} - h_{\text{к}}) \cdot (2w_{\text{с}}), \quad (10.28)$$

где $w_{\text{с}}$ — число витков в секции. Для уменьшения эффекта вытеснения тока в проводниках обмотки якоря, вращающегося в магнитном поле, принимается высота элементарного проводника не более 4 мм при $f \geq 100$ Гц, 7 мм при $f \approx 50$ Гц, 10 мм при $f \leq 25$ Гц. В этом случае допускается разделить эффективный проводник по высоте на два элементарных проводника, каждый из которых имеет высоту, не превышающую допустимый размер по высоте для данной частоты.

По размерам $a_{\text{пр}} \times b_{\text{пр}}$ необходимо выбрать по табл. ПЗ.3 стандартные размеры и сечение проводника.

Обмотки якорей с прямоугольными пазами выполняют из проводников прямоугольного сечения марки ПЭТВП при классе нагревостойкости изоляции В и ПЭТП-155 при классе нагревостойкости изоляции F.

Все типы двигателей серии 4П выполняют с изоляцией класса нагревостойкости F.

Если провода имеют круглое сечение, то при классах нагревостойкости изоляции В и F выбирают марку ПСД, при классе нагревостойкости H — ПСДК.

После проверки размещения всех проводников обмотки якоря в пазу с учетом клина, пазовой и витковой изоляций уточняют размеры паза, которые округляют до ближайшей большей десятой миллиметра.

По выбранному сечению проводника определяют плотность тока, А/мм^2 ,

$$J_a = I_a / q_a \quad (10.29)$$

и произведение AJ_a , $\text{А}^2/\text{мм}^3$.

Полученное значение произведения AJ_a необходимо сравнить с рекомендованными (см. рис. 10.11). Если AJ_a превышает допустимые значения, то необходимо увеличить площадь паза и, повторив расчет зубцовой зоны и размеров проводников, установить окончательные размеры паза.

Размеры секций обмотки якоря (рис. 10.15) определяют по чертежу пакета якоря и обмоточным данным.

Длины переднего l_1 и заднего l_2 вылетов секции равны:

$$l_1 = l_3 + a + b;$$

$$l_2 = l_4 + a + c,$$

где a — прямолинейный участок секции с учетом радиуса изгиба; в зависимости от напряжения значения a равно:

$U, В$	250	500	750	1500
$a, м$	0,013	0,015	0,019	0,025

b — прямолинейный участок концов секции, который при перекрученных проводниках секции равен 0,015–0,02 м, при расплющенных концах секции 0,04 м, при выполнении секции без скрутки проводников 0,012–0,015 м; c — прямолинейные участки лобовых частей передней части секции (с учетом радиуса изгиба):

$$c = 0,004 + r + h_{\text{КТ}}.$$

Прямолинейные участки лобовых частей передней части секции $mn = l_5$ и задней $pq = l_6$ равны:

$$l_5 = y_2 t'_Z / (2 \cos \alpha); \quad l_6 = y_1 t'_2 / (2 \cos \alpha). \quad (10.30)$$

Соответственно вылеты l_3 и l_4 равны:

$$l_3 = y_2 t'_Z \operatorname{tg} \alpha / 2; \quad l_4 = y_1 t'_Z \operatorname{tg} \alpha / 2, \quad (10.31)$$

где

$$y_1 = Z / 2p \pm \epsilon; \quad y_2 = y - y_1.$$

Шаг t'_Z для предварительных расчетов

$$t'_Z = \pi(D - 2h_{\text{П}}) / Z. \quad (10.32)$$

Угол α определяют согласно рис. 10.15:

$$\sin \alpha = (b_{\text{Л}} + \delta_{\text{Л}}) / t'_Z, \quad (10.33)$$

где $b_{\text{Л}}$ — толщина катушки в лобовой части; $b_{\text{Л}} \approx 1,2b_{\text{П}}$; $\delta_{\text{Л}}$ — расстояние между лобовыми частями двух соседних катушек:

$$\delta_{\text{Л}} = (0,4 \div 10) \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Длина полувитка обмотки якоря, м,

$$l_{\text{а ср}} = l_{\text{П}} + 2a + l_5 + l_6 + b + c. \quad (10.34)$$

Сопротивление и массу обмотки определяют соответственно по (10.25), (10.26).

10.5. РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ПОД ГЛАВНЫМИ ПОЛЮСАМИ. КОМПЕНСАЦИОННАЯ ОБМОТКА

Воздушный зазор под главными полюсами является одним из главных размеров машины, хотя выбирают его часто исходя из технологических и конструктивных соображений. Действительно, от размера этого зазора зависят основные характеристики машины, а также потенциальные условия на коллекторе, допустимый диапазон регулирования частоты вращения и т. д.

Поскольку в машинах постоянного тока, за редким исключением, щетки устанавливаются строго по линии геометрической нейтрали, а магнитная цепь насыщена, то при расчете магнитной цепи машины рассматривают только поперечную составляющую реакции якоря и влияние ее на магнитное поле в воздушном зазоре.

Расчет размагничивающего действия поперечной реакции якоря производят по переходной характеристике $B_\delta = \varphi(F_\delta + F_Z + F_j)$ (рис. 10.16), построенной по результатам расчета магнитной цепи (см. табл. 10.19). При нагрузке под действием поперечной реакции якоря магнитное поле в воздушном зазоре искажается: под одним краем полюса индукция уменьшается, под другим возрастает. Точки d и f , отстоящие от ординаты ab на расстоянии $0,5Ab_p$ (где b_p — ширина полюсной дуги), определяют значения $B_{\delta min}$ и $B_{\delta max}$ под крайними полюсами, а кривая daf — распределение индукции в воздушном зазоре на протяжении полюсной дуги.

Среднее значение индукции в воздушном зазоре в этом случае можно определить по формуле, известной из общего курса теории электрических машин:

$$B_{\delta cp} \approx (B_{\delta min} + 4B_\delta + B_{\delta max})/6, \quad (10.35)$$

где B_δ — индукция в воздушном зазоре в режиме холостого хода.

Для определения МДС размагничивания поперечной реакции якоря F_{qd} необходимо ось ab криволинейного четырехугольника $edafh$ сместить по оси $F_{\delta Zj}$ на отрезок bb' . В масштабе МДС этот отрезок определяет размагничивающее действие реакции якоря.

Как видно из рис. 10.16, поперечная реакция якоря нарастает от середины полюсной дуги к его краям. При значительной поперечной реакции может произойти опрокидывание поля под одним краем полюса: точка d сместится по кривой индукции (рис. 10.16) в область отрицательных значений B_δ .

Так как поле реакции якоря замыкается по контуру зубцы якоря, спинка якоря, воздушный зазор, полюсный наконечник, то воздушный зазор выбирают таким, чтобы индукция B_δ на протяжении всей полюсной дуги не изменяла своего направления. Обычно это условие выполняется на всех рабочих диапазонах изменения тока якоря и

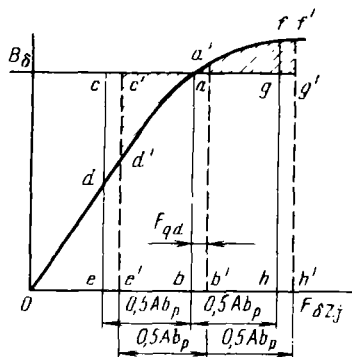


Рис. 10.16. Переходная характеристика машины постоянного тока

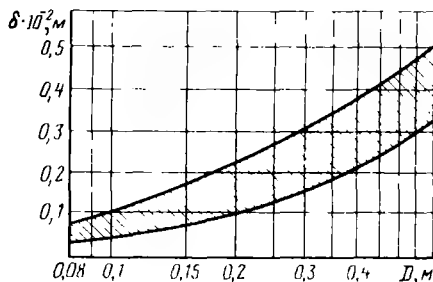


Рис. 10.17. Зависимость длины воздушного зазора от диаметра якоря

индукции в воздушном зазоре, если воздушный зазор δ находится в пределах, указанных на рис. 10.17.

В целях снижения реакции якоря под краями полюсов воздушный зазор может выполняться эксцентричным или с приподнятыми краями полюсов (рис. 10.18). В этом случае воздушный зазор может быть рассчитан по формуле

$$\delta_{\text{расч}} = k\delta_1, \quad (10.36)$$

где $k = \sqrt{\delta_2/\delta_1 - 1} / \arctg \sqrt{\delta_2/\delta_1 - 1}$ — коэффициент приведения неравномерного воздушного зазора, имеющего размер δ_1 под серединой полюса и δ_2 под краем полюсного наконечника.

В машинах серии 4П, в машинах старых серий при диаметрах якоря свыше 300 мм, а также в машинах с широким диапазоном регулирования частоты вращения и большой кратностью перегрузок для компенсации поперечной реакции якоря в зоне полюсной дуги применяют компенсационную обмотку.

Конструктивно компенсационную обмотку выполняют в виде однослойной катушечной, а в крупных машинах — в виде стержневой обмотки и укладывают в пазы наконечников главных полюсов (рис. 10.19) или в пазы статора (см. рис. 10.4) в машинах серии 4П.

Схема выполнения компенсационной обмотки приведена на рис. 10.20, где буквами N и S обозначена полярность добавочных полюсов.

При расчете компенсационной обмотки обычно принимают ее МДС в зоне полюсной дуги в пределах

$$0,85A \frac{b_p}{2} < F_k < 1,15A \frac{b_p}{2}. \quad (10.37)$$

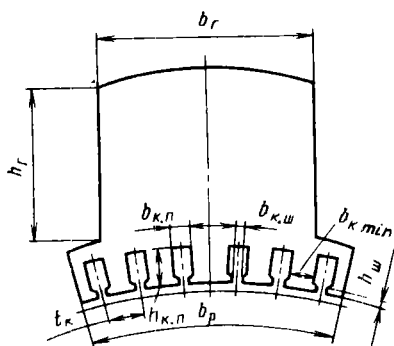


Рис. 10.18. Полюсный наконечник главного полюса

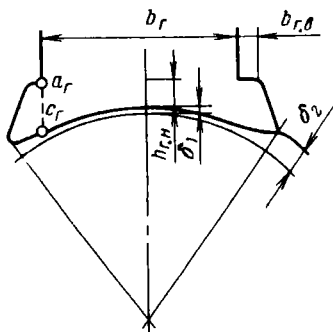


Рис. 10.19. Пазы компенсационной обмотки

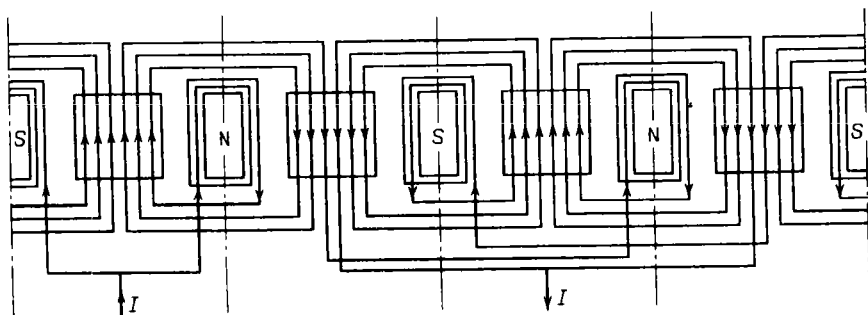


Рис. 10.20. Схема выполнения компенсационной обмотки

Компенсационную обмотку соединяют последовательно с обмоткой якоря, что создает автоматическую компенсацию реакции якоря при любом токе нагрузки.

Во избежание вибраций магнитного происхождения зубцовый шаг по полюсному наконечнику t_k (см. рис. 10.19) должен отличаться от зубцового шага t_{Z_1} по якорю. Это условие обычно выполняется, если число пазов компенсационной обмотки находится в пределах

$$Z_k \neq (0,85 \div 1,15) \frac{Z}{2p} \alpha_\delta. \quad (10.38)$$

Число зубцов Z_k должно быть четным. Выбор числа зубцов Z_k и расчет зубцовой зоны компенсационной обмотки производят в следующем порядке.

Определяют число проводников компенсационной обмотки на один полюс:

$$N_K = Ab_p a_K / I, \quad (10.39)$$

где a_K — число параллельных ветвей компенсационной обмотки; I — ток якоря, А.

Число параллельных ветвей a_K принимают равным единице при токе якоря до 2000 А. Если ток в пазу компенсационной обмотки превышает 2000 А, то ее выполняют в две параллельные ветви: $a_K = 2$.

Выбирая Z_K в диапазоне от 6 до 12, определяют шаг t_K , ширину зубца $b_{ZK} = t_K B_{\delta} \sigma_t / B_{ZK} k_c$, где $\sigma_t = 1,05$ — коэффициент рассеяния главного полюса; $B_{ZK} = 1,6 \div 1,8$ Тл — индукция в минимальном сечении зубца компенсационной обмотки.

Ширина паза в свету равна:

$$b_{\Pi} = t_K \quad b_{ZK \min}. \quad (10.40)$$

При выбранном числе пазов Z_K определяют число проводников обмотки в одном пазу:

$$n_K = N_K / Z_K. \quad (10.41)$$

Число n_K округляют до ближайшего целого числа.

Площадь поперечного сечения проводника компенсационной обмотки

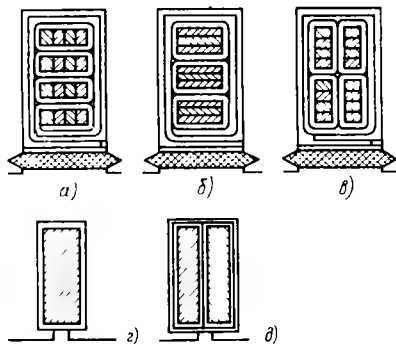
$$q_K = I / (a_K J_K), \quad (10.42)$$

где J_K — плотность тока в компенсационной обмотке.

В зависимости от класса нагревостойкости изоляции плотность тока J_K принимают равной $(4,7 \div 5,2) \cdot 10^6$ А/м² для класса В, $(5,3 \div 5,8) \times 10^6$ А/м² для класса F и $(6,0 \div 6,6) \cdot 10^6$ А/м² для класса H. Плотность тока в компенсационных обмотках машин серии 4П принимают в соответствии с рекомендациями по выбору плотности тока в статорных обмотках асинхронных машин серии 4А.

При числе проводников в пазу не более двух компенсационную обмотку выполняют катушечной с укладкой в открытые пазы. В этом случае проводники размещают в зависимости от выбранных размеров элементарного проводника либо меньшей, либо большей стороной по ширине паза. Стороны катушечных групп могут укладываться как в один, так и в два ряда по ширине паза (рис. 10.21, а–в). При числе проводников в пазу $n_K = 1$ или 2 (рис. 8.21, г, д) обмотку выполняют стержневой. Стержневые обмотки из неизолированной шинной меди изолируют и вставляют с торца в полузакрытые пазы, ширину шлица паза принимают равной 2–3 мм. В лобовых частях стержни соединяют дугами из неизолированной шинной меди.

Рис. 10.21. Укладка проводников в пазы компенсационной обмотки



Конструкция изоляции компенсационных обмоток в пазу и лобовых частях приведена в табл. 10.13 -10.15.

После выбора стандартных размеров проводника, схемы размещения проводников в пазу и класса нагревостойкости изоляции обмотки окончательно рассчитывают размеры пазов, уточняют степень компенсации:

$$k_k = N_k I / (a_k b_{пA}). \quad (10.43)$$

Коэффициент k_k должен находиться в пределах 0,85—1,15.

Высота клина принимается равной $h_k = 2,5$ мм, высота шлица $h_{ш} = 1,0$ мм.

Средняя ширина катушки компенсационной обмотки, м,

$$b_{к.кат.ср} = \frac{\pi(D_{Г} - h_k)}{2p} - \frac{b_p}{2} \frac{(D_{Г} + h_k)}{D_{Г}}, \quad (10.44)$$

где $D_{Г}$ — диаметр внутренней поверхности главного полюса; h_k — высота паза компенсационной обмотки; b_p — ширина полюсного наконечника.

Средняя длина лобовой части компенсационной обмотки, м

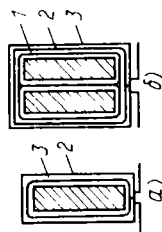
$$l_{к.л} = 1,2b_{к.кат.ср}. \quad (10.45)$$

Средняя длина прямолинейной части катушки компенсационной обмотки, м,

$$l_{к.п} = l_{п} + 2b_{к.л}, \quad (10.46)$$

где $b_{к.л}$ — средняя длина прямолинейного участка компенсационной обмотки от торца полюсного наконечника до радиуса закругления: $b_{к.л} = 0,05$ м при стержневой обмотке и $b_{к.л} = 0,03$ м при катушечной обмотке.

Таблица 10.13. Изоляция комплексационной обмотки машин постоянного тока (пазы прямоугольные полузакрытые, обмотка однослойная стержневая, $h = 355 \div 500$ мм, напряжение до 1000 В)



По- зи- ция	Материал		Число слоев						Двусторонняя толщина изоляции, мм			
	Наименование, марка		Толщина, мм						Рисунок а	Рисунок б		
	Класс нагревостойкости		Класс нагревостой- кости			Класс нагревостой- кости					по ши- рине	по ши- рине
	В	Ф	Н	В	Ф	Н	В	Ф	Н			
1	Стеклослоистовая лента ЛС-ПЭ-994-ПП		Полиимид- ная пленка ПМ		0,1	0,1	0,05	1 вполнахле- ста	2 вполнахле- ста	0,8	0,8	
2	Слюдоплас- тофоль ИФГ-Б	Синтофо- лий Ф	Синтофо- лий Н	0,15	0,16	0,16	4,5 обо- рота	3,5 обо- рота	1,1	1,1	1,1	
3	Лакоткане- слоупласт ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	Фенилоновая бумага		0,15	0,15	0,15	1	1	1	0,3	0,3	0,3
-	Допуск на укладку обмотки								0,2	0,4	0,3	0,4
-	Общая толщина изоляции в пазу								1,6	1,8	2,5	2,6

Таблица 10.14. Изоляция компенсационной обмотки двигателей постоянного тока (пазы прямоугольные открытые, обмотка однослойная секционная из изолированных проводов, $h \approx 355 \div 500$ мм, напряжение до 1000 В, изоляция класса нагревостойкости В)

Часть обмотки	Позиция на рис.	Материал		Число слов	Двусторонняя толщина изоляции, мм			
		Наименование, марка	Толщина, мм		по ширине при $h_{\text{п. шир}}$			
					1	2	3	4
Пазовая	1	Стеклослоупластовая лента ЛИС-КТ	0,14	1 вполне хлеста	0,56	1,12	1,68	2,24
	2	То же	0,14	То же	0,56	0,56	0,56	0,56
	3	Стеклопластиковая лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2
	4	Стеклолакаткань	0,15	1	0,3	0,3	0,3	0,3
	5	Стеклотекстолит	0,5	1	—	0,5	0,5	0,5
	—	Разбухание от пропитки	—	—	0,3	0,3	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки	—	—	0,3	0,3	0,5	0,5
Общая толщина изоляции в пазу (без высоты клина)					2,22	2,78	3,68	4,8
Лобовая	6	Стеклослоупластовая лента ЛИС-КТ	0,14	1 вполне хлеста	0,56	1,12	1,68	2,24
	7	То же	0,14	То же	0,56	0,56	0,56	0,56
	8	Стеклопластиковая лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2
	Общая толщина изоляции секции в лобовой части				1,32	1,88	2,44	3

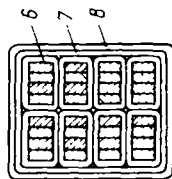
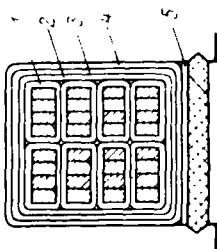
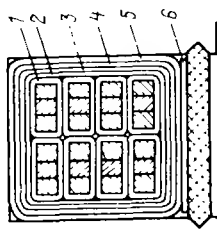
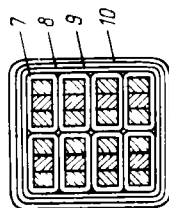


Таблица 10.15. Изоляция компенсационной обмотки машины постоянного тока (пазы прямоугольные открытые, обмотка однослойная секционная из неизолированных проводов, $h = 355 \div 500$ мм, напряжение до 1000 В)

Часть обмотки	Позиция рис.	Материал		Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм						
		Наименование, марка	Толщина, мм		по ширине при $h_{\text{ш.шир}}$		по высоте при $h_{\text{п.выс}}$				
					Класс нагревостойкости	F	H	1	2	3	4
Пазовая	1	Фенилоновая бумага	0,05	2 вполна-хлеста	0,4	0,8	1,2	1,6			
	2	Полиимидная пленка ПМ	0,05	3 вполна-хлеста	0,6	0,6	0,6	0,6			
	3	Фенилоновая бумага	0,05	2 вполна-хлеста	0,4	0,4	0,4	0,4			
	4	Стеклоянная лента ЛЭС	0,1	1 вполна-хлеста	0,4	0,4	0,4	0,4			
	5	Фенилоновая бумага	0,2	1	0,4	0,4	0,4	0,4			
	6	Стеклотекстолит									
		СТЭФ	СТК	1	-	-	0,5	0,5			
		Допуск на укладку обмотки			0,3	0,3	0,5	0,5			
		Общая изоляция в пазу (без высоты клина)			2,5	2,9	3,6	4,0			
								4,4			



Лобовая



7	Фенилоновая бумага	0,05	2 вполне- хлеста	0,4	0,8	0,8	1,2	1,6
8	Полиимидная пленка ПМ	0,05	3 вполне- хлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
9	Фенилоновая бумага	0,05	1 вполне- хлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10	Стеклопленочная лента ЛЭС	0,1	То же	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
—	Общая толщина изоля- ции секции в лобовой части	—	—	1,8	2,2	2,2	2,6	3

Средняя длина полувитка обмотки, м,

$$l_{к.ср} = l_{к.л} + l_{к.п}. \quad (10.47)$$

Сопротивление компенсационной обмотки, Ом,

$$R_k = \rho_{\vartheta} \frac{N_k l_{к.ср} 2p}{a_k^2 q_k}. \quad (10.48)$$

Масса меди компенсационной обмотки, кг,

$$m_k = 8900 l_{к.ср} N_k 2p q_k. \quad (10.49)$$

10.6. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Магнитная система машины постоянного тока представляет собой $2p$ симметричных магнитных цепей (рис. 10.22), каждая из которых состоит из семи последовательно соединенных условно однородных участков: воздушного зазора под главными полюсами, зубцов якоря, ярма якоря, зубцов полюсных наконечников главных полюсов (у компенсированных машин), сердечника главного полюса, зазора между главным полюсом и станиной и станины.

Замкнутый контур магнитных линий пары полюсов является симметричным относительно оси геометрической нейтрали (рис. 10.22), поэтому расчет магнитной цепи машины постоянного тока достаточно производить на один полюс.

Для расчета магнитной цепи необходимо знать размеры всех участков магнитопровода, площади их сечения, магнитные потоки этих участков.

Указанные данные для машин постоянного тока приведены в табл. 10.16. Коэффициенты, приведенные в этой таблице, рассчитывают следующим образом.

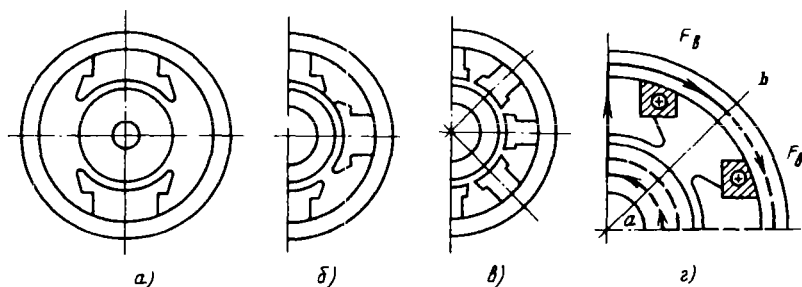


Рис. 10.22. Магнитные системы (а-в) и магнитная цепь (г) машин постоянного тока

Таблица 10.16. Данные для расчета магнитной цепи

Участок магнитной цепи	Расчетная длина участка, м	Площадь сечения участка, м ²	Магнитный поток при номинальном режиме, Вб	Индукция в сечении участка, Тл
Воздушный зазор под главным полюсом	$L_{\delta} = k_{\delta} \delta$	$S_{\delta} = b' l_{\delta} = a_{\delta} \tau l_{\delta}$	$\Phi_{\delta \text{ном}} = \frac{60 a E_H}{n_{\text{ном}} p N}$	$B_{\delta \text{ном}}$
Зубцы якоря овальной формы (см. рис. 10.13)	$L_Z = h_{\text{п}} - 0,2 r_1$	$S_Z = \frac{Z a_{\delta} b_Z l_{\delta} k_c}{2p}$	$\Phi_{\delta \text{ном}}$	$B_Z = \frac{\Phi_{\delta \text{ном}}}{S_Z}$
Зубцы якоря прямоугольной формы (см. рис. 10.14)	$L_Z = h_{\text{п}}$	$S_{Z3} = \frac{\pi a_{\delta} l_{\delta}}{2p} (D - 2h_{\text{п}} - Z b_{\text{п}}) k_c$	$\Phi_{\delta \text{ном}}$	$B_{Z3} = \frac{\Phi_{\delta \text{ном}}}{S_{Z3}}$
Ярмо якоря	$L_j = \frac{\pi(D_0 + h_j)}{4p} + \frac{h_j}{2}$	$S_j = l (h_j - 2/3 a) k_c$	$\Phi_{\delta \text{ном}}$	$B_j = \frac{\Phi_{\delta \text{ном}}}{2S_j}$
Зубцы наконечника главного полюса (см. рис. 10.18) с компенсационной обмоткой	$L_{\text{к.п}} = h_{\text{к.п}}$	$S_{\text{к.п}} = (b_p - Z_{\text{к}} b_{\text{к.п}}) l_{\text{г}} k_c$	$\sigma_{\text{г}} \Phi_{\delta \text{ном}}$	$B_{\text{к}} = \frac{\Phi_{\delta \text{ном}} \sigma_{\text{г}}}{S_{\text{к.п}}}$

Участок магнитной цепи	Расчетная длина участка, м	Площадь сечения участка, м ²	Магнитный поток при номинальном режиме, Вб	Индукция в сечении участка, Тл
Сердечник главного полюса (см. рис. 10.19, 10.18)	$L_{\Gamma} = h_{\Gamma}$	$S_{\Gamma} = l_{\Gamma} b_{\Gamma} k_c$	$\sigma_{\Gamma} \Phi_{\delta \text{ном}}$	$B_{\Gamma} = \frac{\Phi_{\delta \text{ном}} \sigma_{\Gamma}}{S_{\Gamma}}$
Зазор между главным полюсом и станиной	$L_{c.п} = \delta_{c.п} = 2l_{\Gamma} \cdot 10^{-4} + 10^{-4}$	$S_{c.п} = S_{\Gamma}$	$\sigma_{\Gamma} \Phi_{\delta \text{ном}}$	$B_{c.п} = \frac{\Phi_{\delta \text{ном}} \sigma_{\Gamma}}{S_{c.п}} \approx \approx B_{\Gamma}$
Станина	$L_c = \frac{\pi(D_{\text{вн}} + b_c)}{4p} + \frac{b_c}{2}$	$S_c = z c h_c$	$\sigma_{\Gamma} \frac{\Phi_{\delta \text{ном}}}{2}$	$B_c = \frac{\Phi_{\delta \text{ном}} \sigma_{\Gamma}}{2 S_c}$

1. Коэффициент воздушного зазора k_{δ} , учитывающий влияние зубчатости якоря $k_{\delta a}$, зубцов компенсационной обмотки на главном полюсе $k_{\delta k}$, бандажных канавок $k_{\delta б.к}$ и радиальных вентиляционных каналов $k_{в.к}$ на магнитное сопротивление воздушного зазора, равен:

$$k_{\delta} = k_{\delta a} k_{\delta k} k_{\delta б.к} k_{в.к}, \quad (10.50a)$$

где

$$k_{\delta a} = 1 + \frac{b_{ш}}{t_{Z1} b_{ш} + 5\delta t_{Z1} / b_{ш}},$$

или

$$k_{\delta a} = \frac{t_{Z1} + 10\delta}{t_{Z1} b_{ш} + 10\delta}; \quad (10.50б)$$

$b_{ш}$ и t_{Z1} — по рис. 10.13; при прямоугольных пазах (см. рис. 10.14) вместо $b_{ш}$ вводится $b_{п}$;

$$k_{\delta k} = 1 + \frac{b_{к.ш}}{t_{к} - b_{к.ш} + 5\delta t_{к} / b_{к.ш}}, \quad (10.50в)$$

$b_{к.ш}$, $t_{к.ш}$ — по рис. 10.18.

При бандажах из немагнитного материала

$$k_{\delta б.к} = 1 + \frac{b_{б} h_{б}}{l_a (\delta + h_{б}) - b_{б} h_{б}}, \quad (10.50г)$$

где $b_{б}$ — общая ширина бандажных канавок на якоре; $h_{б}$ — глубина бандажных канавок; l_a — длина якоря.

При бандажах из магнитной проволоки

$$k_{\delta б.к} = 1 + \frac{b_{б} (h_{б} + 0,8d)}{l_a (\delta + h_{б} - 0,8d) - b_{б} (h_{б} - 0,8d)}, \quad (10.50д)$$

где d — диаметр бандажной проволоки.

Размеры и число бандажных канавок определяются предварительно и уточняются после механического расчета бандажа (см. гл. 11).

Коэффициент

$$k_{в.к} = 1 + \frac{3\delta}{l_{п} + 3\delta (1 + l_{п} / b_{в.к})}, \quad (10.51)$$

где $l_{п}$ — длина пакета; $b_{в.к}$ — ширина вентиляционного канала.

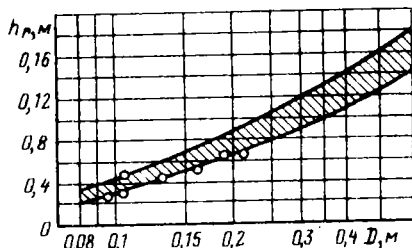


Рис. 10.23. К определению высоты главного полюса

2. Расчетная ширина полюсной дуги $b'_p = b_p$ при эксцентричном зазоре под главными полюсами и $b'_p = b_p + 2\delta$ при концентрическом зазоре под главными полюсами с компенсационной обмоткой.

3. Расчетная длина якоря l_δ равна длине пакета якоря $l_{ст}$, т. е. $l_\delta = l_a$ при отсутствии радиальных вентиляционных каналов и $l_\delta = l_n - n_k b_{в.к}$ при наличии n_k радиальных вентиляционных каналов шириной $b_{в.к}$ каждого канала.

4. Расчетная длина станины l_c для машин постоянного тока может быть принята:

$$l_c = l_r + 0,4D, \quad (10.52)$$

где l_r — длина главного полюса.

5. Высоту главного полюса h_r для машин постоянного тока с диаметром якоря до 0,5 м предварительно можно определить по рис. 10.23. При $D > 0,5$ м для предварительного определения высоты полюса необходимо использовать установленные зависимости $D_{вн} = \varphi(D; p)$, приведенные на рис. 10.5.

6. Высота станины h_c определяется при известных радиальных размерах магнитной системы:

$$h_c = \frac{D_{вн} - (D + 2\delta)}{2} - h_r - h_{г.н}, \quad (10.53)$$

где $h_{г.н}$ — высота наконечника главного полюса (см. рис. 10.19), выбирается исходя из условия, чтобы магнитная индукция в сечении $a_{гсг}$ не превышала 1,8–1,9 Тл; индукция в станине из массивной стали не должна превышать $B_c = 1,3$ Тл (1,05 Тл при классе изоляции Н). Увеличение магнитной индукции сверх установленных значений приводит в первую очередь к ухудшению коммутации машины.

7. Ширина выступа наконечника главного полюса $b_{г.в}$ может быть принята равной $(0,1 - 0,15) b_r$.

Ширина сердечника главного полюса

$$b_r = \sigma_r \Phi_{\delta_{ном}} / (k_c l_r B_r), \quad (10.54)$$

Таблица 10.17. Расчет характеристик намагничивания машины

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	$0,5 \Phi_{\delta \text{ном}}$	$0,75 \Phi_{\delta \text{ном}}$	$0,9 \Phi_{\delta \text{ном}}$	$\Phi_{\delta \text{ном}}$	$1,1 \Phi_{\delta \text{ном}}$	$1,15 \Phi_{\delta \text{ном}}$
1	ЭДС	E	В						
2	Магнитный поток	$\Phi_{\delta} = \frac{60 a E}{p N n}$	Вб						
3	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\alpha_{\delta} \tau'_{\delta}}$	Тл						
4	МДС воздушного зазора	$F_{\delta} = 0,8 B_{\delta} L_{\delta} \cdot 10^6$	А						
5	Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_{Z1} = k_{Z1} B_{\delta}$ $B_{Z2} = k_{Z1} B_{\delta}$ $B_{Z3} = k_{Z3} B_{\delta}$	Тл						
6	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря (см. приложение 2)	H_{Z1} H_{Z2} H_{Z3}	А/м						
7	Средняя напряженность магнитного поля в зубцах	$H_{Z \text{ ср}} = \frac{H_{Z1} + \rightarrow + 4 H_{Z2} + H_{Z3}}{6}$	А/м						
8	Магнитное напряжение зубцов	$F_Z = L_Z H_{Z \text{ ср}}$	А						

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	$0,5\Phi_{\delta\text{ном}}$	$0,75\Phi_{\delta\text{ном}}$	$0,9\Phi_{\delta\text{ном}}$	$\Phi_{\delta\text{ном}}$	$1,1\Phi_{\delta\text{ном}}$	$1,15\Phi_{\delta\text{ном}}$
9	Магнитная индукция в спинке якоря (см. табл. 10.18)	$B_j = \Phi_{\delta} / (2S_j)$	Тл						
10	Напряженность магнитного поля в спинке якоря (см. приложение 1)	H_j	А/м						
11	Магнитное напряжение спинки якоря	$F_j = L_j H_j$	А						
12	Магнитный поток главного полюса	$\Phi_{\Gamma} = \sigma_{\Gamma} \Phi_{\delta}$	Вб						
13	Магнитная индукция в сердечнике главного полюса	$B_{\Gamma} = \Phi_{\Gamma} / S_{\Gamma}$	Тл						
14	Напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса	H_{Γ}	А/м						
15	Магнитное напряжение сердечника главного полюса	$F_{\Gamma} = L_{\Gamma} H_{\Gamma}$	А						

16	Магнитная индукция в зубцах наконечника главного полюса (компенсационной обмотки)	$B_{Zк} = \frac{\sigma_{\Gamma} \Phi_{\delta \text{ном}}}{S_{к.п}}$	Тл
17	Напряженность магнитного поля в зубцах компенсационной обмотки	$H_{Zк}$	А/м
18	Магнитное напряжение зубцов наконечника главного полюса	$F_{к.п} = L_{к.п} H_{Zк}$	А
19	Магнитная индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и статорной	$B_{с.п} = B_{\Gamma}$	Тл
20	Магнитное напряжение воздушного зазора между статорной и главным полюсом	$F_{с.п} = 0,8 L_{с.п} B_{\Gamma} \times 10^6$	А
21	Магнитная индукция в статоре	$B_{с} = \frac{\sigma_{\Gamma} \Phi_{\delta}}{2S_{с}}$	Тл

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	0,5 $\Phi_{\delta \text{ном}}$	0,75 $\Phi_{\delta \text{ном}}$	0,9 $\Phi_{\delta \text{ном}}$	$\Phi_{\delta \text{ном}}$	1,1 $\Phi_{\delta \text{ном}}$	1,15 $\Phi_{\delta \text{ном}}$
22	Напряженность магнитного поля в станине	H_c	А/м						
23	Магнитное напряжение станины	$F_c = L_c H_c$	А						
24	Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи	$F_\delta + F_Z + F_j + F_T + F_{Z_k} + F_{c.п.} + F_c = F_\Sigma$	А						
25	Сумма магнитных напряжений участков переходного слоя	$F_\delta + F_Z + F_j = F_{\delta Z j}$	А						

Примечание. При определении магнитного напряжения зубцового слоя следует определять напряженность магнитного поля по кривым приложения 2, которые построены при $B_Z > 1,8 \text{ Тл}$ с учетом выпеснения магнитного поля в паз. Для открытых пазов (см. рис. 10.14)

$$k_{Z1} = \frac{l_{Z1} l_\delta}{b_{Z1} l_a k_c}; \quad k_{Z2} = \frac{l_{Z2} l_\delta}{b_{Z2} l_a k_c}; \quad k_{Z3} = \frac{l_{Z3} l_\delta}{b_{Z3} l_a k_c};$$

для овальных пазов (см. рис. 10.13)

$$k_{Z1} = \frac{l_{Z1} l_\delta}{b_{Z1} l_a k_c}; \quad k_{Z2} = \frac{l_{Z2} l_\delta}{b_{Z2} l_a k_c}; \quad k_{Z3} = \frac{l_{Z3} l_\delta}{b_{Z3} l_a k_c}.$$

где B_r — индукция в сердечнике главного полюса. Для сталей марок 3411, 3412, 3413 $B_r = 1,6 \div 1,7$ Тл, для сталей марок 1211 и 1212 $B_r = 1,35 \div 1,55$ Тл. При исполнении машины по степени защиты IP44 и способам охлаждения IC0141 и IC0041 индукция B_r должна быть снижена на 0,2–0,3 Тл.

8. Коэффициент магнитного рассеяния главных полюсов σ_r зависит от воздушного зазора δ , ширины межполюсного окна $\tau - b_p$ и ширины полюсного наконечника добавочного полюса.

В каждом конкретном случае путем моделирования магнитного поля в воздушном зазоре можно определить σ_r .

При расчетах магнитных цепей машин постоянного тока можно принять $\sigma_r = 1,15$ для двухполюсных машин, $\sigma_r = 1,2$ для четырехполюсных машин без компенсационной обмотки, $\sigma_r = 1,25$ при $2p = 4$ и 6 и наличии компенсационной обмотки.

Для построения характеристики намагничивания машины постоянного тока необходимо определить сумму МДС всех участков магнитной цепи при значениях магнитного потока в воздушном зазоре $\Phi_\delta = 0,5; 0,75; 0,9; 1,1$ и $1,15\Phi_{\delta\text{ном}}$.

Расчет характеристики намагничивания производится по приведенной в табл. 10.17 форме.

По данным табл. 10.17 строят характеристику намагничивания машины постоянного тока $B_\delta = f(F_\Sigma)$ и переходную характеристику

$$B_\delta = \varphi(F_{\delta ZI}). \quad (10.55)$$

10.7. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Магнитодвижущая сила обмоток параллельного или независимого возбуждения на один полюс при нагрузке, А,

$$F_{\text{в}} = F_\Sigma + F_{qd} \pm F_d - F_c, \quad (10.56)$$

где F_d — продольная составляющая реакции якоря, возникающая при сдвиге щеток с геометрической нейтрали на относительную дугу α : $F_d = 2A\alpha$; F_c — МДС стабилизирующей обмотки; F_{qd} — размагничивающее действие поперечной реакции якоря.

При компенсации реакции якоря компенсационной обмотки составляющая F_{qd} принимается равной нулю.

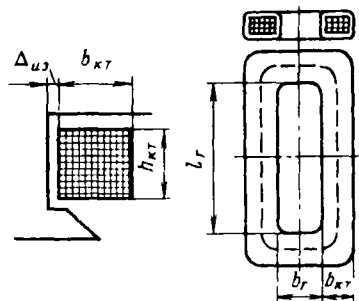
Конструкции изоляции и крепления обмоток главных полюсов приведены в табл. 10.2, 10.3.

Средняя длина витка обмотки главного полюса (рис. 10.24), м,

$$l_{\text{в.ср}} = 2(l_r + b_r) + \pi(b_{\text{к.в}} + 2\Delta_{\text{из}}), \quad (10.57)$$

где $\Delta_{\text{из}}$ — толщина изоляции катушки по табл. 10.2, 10.3 плюс одно-

Рис. 10.24. К определению размеров катушек обмоток главных полюсов



сторонний зазор между катушкой и полюсом, который принимается равным $(0,5 - 0,8) \cdot 10^{-3}$ м при диаметрах якоря до 0,5 м.

Площадь сечения проводника обмотки при последовательном соединении катушек, м^2 ,

$$q_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{ж}} k_3 2p F_{\text{в}} l_{\text{в.ср}}}{U_{\text{в}}}, \quad (10.58)$$

где k_3 — коэффициент запаса МДС обмотки возбуждения: $k_3 = 1,1 \div 1,2$.

Марка и размеры проводов обмоток возбуждения выбираются в соответствии с табл. 10.18.

Многослойные катушки из проводников круглого сечения выполняют сплошными. Размеры катушек (рис. 10.24) ориентировочно могут быть приняты в зависимости от диаметра якоря:

D , м	0,09	0,106	0,110
$b_{\text{КТ}} \times h_{\text{КТ}}$, м	$0,023 \times 0,019$	$0,032 \times 0,018$	$0,024 \times 0,023$
D , м	0,132	0,156	0,18
$b_{\text{КТ}} \times h_{\text{КТ}}$, м	$0,025 \times 0,03$	$0,025 \times 0,038$	$0,03 \times 0,04$

Катушки обмоток возбуждения машин с диаметром якоря свыше 0,2 м выполняют секционированными. Это увеличивает поверхность

Таблица 10.18

Сечение, м^2	Марка провода	Тип обмотки
$< 8 \cdot 10^{-6}$	ПЭТВ, ПЭТ-155, ПСД, ПСДК	Многослойная катушка; проводники круглого сечения
$(8 - 25) \cdot 10^{-6}$	ПЭТВЛ, ПЭТП-155, ПСД, ПСДК	Многослойная катушка; проводники прямоугольного сечения с отношением сторон 1,4–1,8
$> 25 \cdot 10^{-6}$	Голая шинная медь	Однослойная по ширине катушка с намоткой меди на ребро

охлаждения обмоток и позволяет повысить плотность тока в обмотке возбуждения.

Проводники прямоугольного сечения и проводники из шинной меди наматываются плашмя, меньшей стороной сечения проводника по высоте катушки.

Для расчета числа витков необходимо задаться плотностью тока J_B в обмотке возбуждения. Средние значения J_B могут быть приняты равными $(2 - 3) \cdot 10^6$ А/м² при исполнении по степени защиты IP44 и $(4,5 - 6) \cdot 10^6$ А/м² при исполнении по степени защиты IP22.

Число витков обмотки на один полюс

$$w_B = F_B / J_B q_B, \quad (10.59)$$

где $J_B q_B = I_{B.ном}$ — номинальный ток возбуждения.

При укладке обмотки в межполюсном окне необходимо обеспечить воздушные промежутки между краями главных и добавочных полюсов и выступающими краями катушек и внутренней поверхностью станины не менее $(6 - 8) \cdot 10^{-3}$ м.

Площадь сечения катушки, м²,

$$S_{KT} = w_B d_{из}^2 / k_{з.в}, \quad (10.60)$$

где $d_{из}$ — диаметр изолированного провода (при проводах прямоугольного сечения необходимо вместо $d_{из}$ ввести $a_{пр} \times b_{пр}$); $k_{з.в}$ — коэффициент заполнения, определяющий разбухание катушки.

Окончательные размеры катушек обмоток возбуждения устанавливаются после размещения в межполюсном окне главных и добавочных полюсов. Если площадь межполюсного окна не позволяет разместить обмотки, то необходимо увеличить внутренний диаметр станины.

Сопротивление обмотки возбуждения, Ом,

$$R_B = \rho_{\text{ж}} 2 p w_B l_{B.ср} / q_B. \quad (10.61)$$

Масса меди параллельной обмотки, кг,

$$m_{м.в} = 19,6 p l_{B.ср} m_B q_B. \quad (10.62)$$

Максимальный ток обмотки возбуждения, А,

$$I_{B \max} = U_B / R_B. \quad (10.63)$$

Коэффициент запаса

$$k_3 = I_{B \max} w_B / F_B, \quad (10.64)$$

где k_3 должен быть не менее 1,1.

На главных полюсах машин без компенсационных обмоток параллельного или независимого возбуждения в целях повышения устойчи-

ности работы двигателя и частичной компенсации реакции якоря выполняют стабилизирующую обмотку, которая соединяется последовательно с обмоткой якоря и обмоткой добавочных полюсов. Конструктивно стабилизирующая обмотка располагается либо у полюсного наконечника, либо между секциями катушек главных полюсов, при этом она одновременно выполняет роль дистанционной прокладки.

Плотность тока J_c стабилизирующей обмотки принимается в первом приближении равной плотности тока в обмотках главных полюсов.

Число параллельных ветвей стабилизирующей обмотки принимается равным числу ветвей компенсационной обмотки и обмотки добавочных полюсов.

Число витков на один полюс стабилизирующей обмотки

$$w_c = F_{qd} a_d / I, \quad (10.65)$$

где F_{qd} — размагничивающее действие поперечной реакции якоря, А; I — ток якоря, А; a_d — число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов.

Полученное число витков округляют до ближайшего целого числа. Марка провода и конструкция обмотки выбираются согласно табл. 10.18.

Средняя длина витка обмотки, м,

$$l_{c.c.p} = 2(l_r + b_r) + \pi(b_{к.с} + 2\Delta_{из}), \quad (10.66)$$

где $\Delta_{из}$ — толщина изоляции катушки согласно табл. 9.2 и 9.3 плюс односторонний зазор между катушкой и полюсом, который принимается равным $(0,5 - 0,8) \cdot 10^{-3}$ при диаметрах якоря до 500 мм; $b_{к.с}$ — ширина катушки, которая определяется после выбора марки провода и размещения обмотки в межполюсном окне.

Сопротивление стабилизирующей обмотки, Ом,

$$R_c = \rho_{\vartheta} \frac{2p w_c l_{c.c.p}}{q_c}. \quad (10.67)$$

10.8. РАСЧЕТ КОММУТАЦИИ

Коммутационную надежность машин постоянного тока обычно оценивают по ширине зоны безыскровой работы машины $\Delta I_{дп} = f(I_a)$, границы которой определяют экспериментально по значениям токов подпитки или отпитки $\Delta I_{дп}$ добавочных полюсов, вызывающих появление искрения под сбегающими краями щеток. ГОСТ 183-74 устанавливает, что при номинальном режиме работы машины степень искрения не должна превышать класса 1,5. При этом уровне искрения наблюдается лишь слабое точечное искрение под большей частью элект-

рошетки, которое, однако, не должно оказывать существенного влияния на срок службы коллекторно-щеточного узла машины.

Косвенным критерием оценки коммутационной напряженности является реактивная ЭДС E_p , которая индуцируется в замкнутой накоротко секции во время ее коммутации.

Для машин с высотой оси вращения до 200 мм ЭДС E_p не должна превышать 2,5–3,5 В. В машинах с высотой оси вращения до 355 мм максимально допустимая ЭДС E_{pmax} может достигать 5 В.

Реактивная ЭДС коммутируемой секции, В,

$$E_p = 2w_c l_{\delta} A v_a \lambda \cdot 10^{-6}, \quad (10.68)$$

где w_c — число витков в секции; l_a — длина якоря, м; A — линейная нагрузка, А/м; $v_a = \pi D n_{ном}/60$ — окружная скорость якоря, м/с; λ — приведенная удельная магнитная проводимость пазового рассеяния.

Для овальных полузакрытых пазов (см. рис. 10.13)

$$\lambda = 0,6 \frac{h_{\Pi}}{2r_2} + \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi}} + \frac{l_{\Pi}}{l_a} + \frac{2,5 \cdot 10^5}{w_c l_a A v_a} \frac{a}{p}; \quad (10.69)$$

для прямоугольных пазов (см. рис. 10.14)

$$\lambda = 0,6 \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi}} + \frac{l_{\Pi}}{l_a} + \frac{2,5 \cdot 10^5}{w_c l_a A v_a} \frac{a}{p}. \quad (10.70)$$

Так как активные стороны секций вступают в процесс коммутации не одновременно, а через определенные интервалы времени, зависящие от ширины щетки, коэффициента укорочения обмотки, числа секционных сторон в пазу и т. д., то расчет результирующей проводимости пазового рассеяния представляет собой довольно трудоемкую задачу.

По формулам (10.68)–(10.70) с достаточной точностью можно рассчитать ЭДС коммутации для машин общего назначения, когда диаметр якоря не превышает 300 мм, а условия коммутации не являются напряженными.

Для расчета коммутации напряженных в коммутационном отношении машин, а также машин с диаметром якоря свыше 300 мм используют зависимости, определяющие средний за период коммутации эффект взаимодействия секций, расположенных в одном пазу. В этом случае средний результирующий коэффициент удельной проводимости пазового рассеяния

$$\lambda'_\Pi = \frac{4u'}{2\gamma_i} (\lambda_\Pi + \lambda_{к.д.}) + \lambda_\Pi \frac{l_\Pi}{l_a}. \quad (10.71)$$

Здесь коэффициент $4u'$ принимается по рис. 10.25;

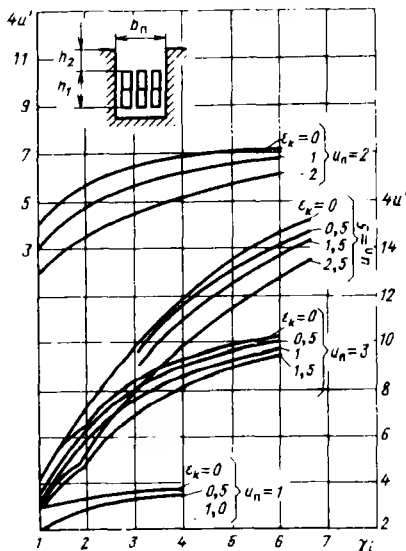


Рис. 10.25. К расчету результирующего коэффициента проводимости пазового рассеяния

$$\lambda_{\Pi} = 1,25 \frac{h_1}{3b_{\Pi}} + \frac{h_2}{b_{\Pi}}, \quad (10.72)$$

где размеры h_1 , h_2 , b_{Π} — по рис. 10.25,

$$\lambda_{\kappa.д} = b_{Z1}/2\delta_d, \quad (10.73)$$

b_{Z1} — по рис. 10.14; δ_d — воздушный зазор под добавочным полюсом, предварительно принимается $\delta_d \approx 0,02D$; $\lambda_{\Pi} = 0,75$ при бандажах на лобовой части обмотки якоря из магнитной проволоки и $\lambda_{\Pi} = 0,5$ при стеклобандажах и бандажах из немагнитной проволоки; γ_i — относительная ширина щетки, определяющая число одновременно коммутируемых секций:

$$\gamma_i = \frac{b_{щ}}{t_{\kappa}} + \left(1 + \frac{a}{p}\right), \quad (10.74)$$

где t_{κ} — коллекторное деление.

При расчете λ по (10.69), (10.70) необходимо предварительно выбрать ширину щетки. Ширина щетки принимается $b_{щ} = (2 \div 4)t_{\kappa}$ при простых волновых обмотках, $b_{щ} = u_{\Pi} + 0,5$ при простых петлевых обмотках и $b_{щ} > 3t_{\kappa}$ при двухходовых петлевых обмотках.

Ширина щетки $b_{щ}$ определяет ширину зоны коммутации $b_{з.к}$, т. е. ширину дуги окружности поверхности якоря, в границах которой находятся коммутируемые секции:

$$b_{з.к} = \left(\frac{b_{щ}}{t_{\kappa}} + u_{\Pi} - \frac{a}{p} + \epsilon_{\kappa} \right) t_{\kappa} \frac{D}{D_{\kappa}}. \quad (10.75)$$

Диаметр коллектора D_{κ} , коллекторное деление t_{κ} , а также u_{Π} выбирают согласно данным § 10.4; укорочение обмотки в коллекторных делениях $\epsilon_{\kappa} = K/(2p) - y_1$ принимают всегда со знаком плюс. Ширина

щетки должна обеспечить ширину зоны коммутации:

$$b_{з.к} \leq (0,55 \div 0,7) (\tau - b_p). \quad (10.76)$$

где $\tau - b_p = b_{н.з}$ — ширина нейтральной зоны.

Верхние границы этого отношения относятся к машинам с диаметром якоря до 0,2 м, нижние значения принимаются при диаметрах якоря выше 0,4 м. При отсутствии добавочных полюсов в машинах малой мощности отношение $b_{з.к}/(\tau - b_p)$ можно выбирать в пределах 0,8–1,25.

Принятое значение ширины щетки округляется до ближайшего стандартного размера $b_{щ}$ (см. табл. П4.1).

Выбор марки щеток для машин постоянного тока — весьма сложная задача, так как от марки щеток зависят коммутация машины и срок службы коллекторно-щеточного узла.

На практике марку щеток определяют в соответствии с условиями работы согласно табл. П4.2, где приведены основные технические данные марок наиболее распространенных щеток и области их применения.

Контактная площадь всех щеток, м^2 ,

$$\Sigma S_{щ} = \frac{2I_{ном}}{J_{щ}} 10^4, \quad (10.77)$$

где $J_{щ}$ — плотность тока в щеточном контакте, А/см^2 (см. табл. П4.2).

Контактная площадь щеток одного brackets (щеточного болта)

$$S_{щ.б} = \Sigma S_{щ} / (2p). \quad (10.78)$$

По табл. П4.1 выбирают длину $l_{щ}$ одной щетки, определяют площадь щеточного контакта одной щетки $S_{щ} = b_{щ} l_{щ}$ и рассчитывают число щеток на один щеточный болт:

$$S_{щ.б} / S_{щ} = N_{щ}. \quad (10.79)$$

По выбранным размерам щеток $b_{щ}$, $l_{щ}$ и $N_{щ}$ определяют фактическую контактную площадь и уточняют плотность тока в щеточном контакте $J_{щ}$.

Активная длина коллектора при шахматном расположении щеток по длине коллектора, м,

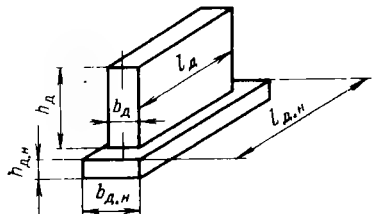
$$l_k = N_{щ} (l_{щ} + 0,008) + 0,01, \quad (10.80)$$

где $l_{щ}$ — длина щетки, м.

Механический расчет коллекторов приведен в гл. 11.

10.9. РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Магнитодвижущая сила обмотки добавочных полюсов должна создать в зоне коммутации магнитное поле, индуктирующее в коммути-



руемой секции ЭДС коммутации E_k , направленную встречно реактивной ЭДС E_p . Электродвижущая сила E_k должна быть несколько больше E_p , чтобы процесс коммутации протекал с некоторым ускорением. При расчете индукции в воздушном зазоре под добавочными полюсами $B_{\delta d}$ принимают расчетное значение реактивной ЭДС $E'_p = (1,05 \div 1,1) E_p$.

В этом случае индукция $B_{\delta d}$, Тл,

$$B_{\delta d} = E'_p / (2w_c l_{\delta} \nu_a). \quad (10.81)$$

Ширина наконечника добавочного полюса (рис. 10.26), м,

$$b_{д.н} \leq (0,55 \div 0,75) b_{з.к}. \quad (10.82)$$

Длину наконечника добавочного полюса $l_{д.н}$ принимают равной длине якоря: $l_{д.н} = l_a$. Магнитный поток добавочного полюса в воздушном зазоре в зоне коммутации, Вб,

$$\Phi_{\delta d} = B_{\delta d} b'_{д.н} l_{д.н}, \quad (10.83)$$

где $b'_{д.н} = b_{д.н} + 2\delta_d$ — расчетная ширина полюсного наконечника добавочного полюса.

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса, Вб,

$$\Phi_d = \sigma_d \Phi_{\delta d}, \quad (10.84)$$

где σ_d — коэффициент рассеяния добавочных полюсов: $\sigma_d = 2,5 \div 3,5$ для машин без компенсационной обмотки, $\sigma_d = 2$ для машин с компенсационной обмоткой.

Ширину сердечника добавочного полюса b_d предварительно определяют по зависимости на рис. 10.27, а. Длину сердечника добавочного полюса l_d принимают равной длине якоря; для машин с диаметром якоря до 0,132 м длина l_d короче длины полюсного наконечника на $(5 - 10) \cdot 10^{-3}$ м.

Индукция в сердечнике добавочного полюса, Тл,

$$B_{с.д} = \Phi_d / (b_d l_d) \quad (10.85)$$

Она не должна превышать 1,6 Тл.

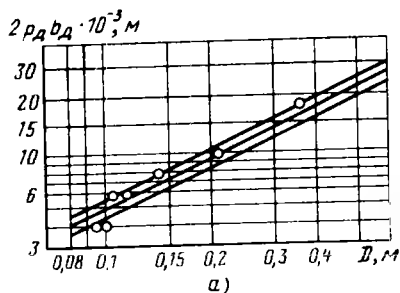
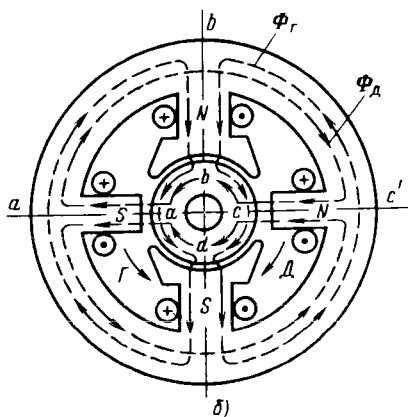


Рис. 10.27. К расчету магнитной цепи добавочных полюсов:

a — зависимость ширины добавочного полюса от диаметра якоря; b — магнитные цепи главных и добавочных полюсов



Сердечники добавочных полюсов выполняют из стали марки Ст3 при диаметрах якоря до 0,16 м, при больших диаметрах — из листов электротехнической стали марки 3411 толщиной 1,0 мм. В зависимости от отношения ширины полюсного наконечника к ширине сердечника форма поперечного сечения добавочного полюса может быть прямоугольной (см. рис. 10.26) и прямоугольной со скошенным наконечником при $b_{д.н} < b_{д.с}$.

Для расчета МДС обмотки добавочных полюсов необходимо определить магнитные напряжения отдельных участков и полную МДС магнитной цепи на один полюс в соответствии с табл. 10.19.

Распределение магнитных потоков главных полюсов Φ_r и добавочных полюсов Φ_d в магнитной системе машины показано на рис. 10.27, б.

Магнитодвижущая сила обмотки добавочных полюсов для машин постоянного тока без компенсационной обмотки находится в пределах

$$F_d = (1,2 \div 1,4) A \frac{\tau}{2}. \quad (10.86)$$

Число витков обмотки на один добавочный полюс

$$w_d = (F_d a_d) / I, \quad (10.87)$$

где a_d — число параллельных ветвей обмотки добавочного полюса, обычно a_d равно числу параллельных ветвей компенсационной обмотки; число витков округляется до ближайшего целого числа.

Сечение провода обмотки добавочных полюсов, m^2 ,

$$q_d = I / (a_d J_d). \quad (10.88)$$

Таблица 10.19. Расчет МДС обмотки добавочных полюсов

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
1	Магнитный поток в воздушном зазоре	$\Phi_{\delta д}$	Вб	
2	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_{\delta д} = \frac{\Phi_{\delta д}}{b_{д} l_{д}}$	Тл	
3	Магнитное напряжение воздушного зазора	$F_{\delta д} = 0,8 \delta_{д} k_{\delta д} B_{\delta д} \cdot 10^6$	А	
4	Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_{Z1} = k_{Z1} B_{\delta д}$ $B_{Z2} = k_{Z2} B_{\delta д}$ $B_{Z3} = k_{Z3} B_{\delta д}$	Тл	
5	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря по приложению 1	H_{Z1} H_{Z2} H_{Z3}	А/м А/м А/м	
6	Средняя напряженность поля в зубцах	$H_{Z ср} = \frac{H_{Z1} + 4H_{Z2} + H_{Z3}}{6} \rightarrow$	А/м	
7	Магнитное напряжение зубцов	$F_Z = L_Z H_{Z ср}$	А/м	
8	Магнитная индукция в спинке ярма: на участке согласного направления главного потока добавочных полюсов	$B_{j1} = \frac{\Phi_{\delta} + \Phi_{\delta д}}{2S_j}$	Тл	
	на участке встречного направления главного потока и потока добавочных полюсов	$B_{j2} = \frac{\Phi_{\delta} - \Phi_{\delta д}}{2S_j}$	Тл	
9	Напряженность магнитного поля: на участке с индукцией B_{j1} на участке с индукцией B_{j2} средняя напряженность магнитного поля в ярме	H_{j1} H_{j2} $H_{j ср} = (H_{j1} - H_{j2})/2$	А/м А/м А/м	

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
10	Магнитное напряжение ярма якоря	$F_j = H_j \text{ ср } L_j$	А	
11	Магнитный поток добавочного полюса	$\Phi_d = \sigma_d \Phi_{\delta d}$	Вб	
12	Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса	$B_{c.d} = \frac{\Phi_d}{b_d r_d}$	Тл	
13	Напряженность магнитного поля в сердечнике добавочного полюса	$H_{c.d}$	Тл	
14	Магнитное напряжение в сердечнике добавочного полюса	$F_{c.d} = H_{c.d} h_d$	А	
15	Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и добавочным полюсом	$F_{\delta d2} = 0,8 B_d \delta_{d2} \cdot 10^6$	А	
16	Магнитная индукция в станине: на участке согласного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов на участке встречного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов	$B_{c1} = \frac{\Phi_r + \Phi_d}{2S_c}$ $B_{c2} = \frac{\Phi_r - \Phi_d}{2S_c}$	Тл Тл	
17	Напряженность магнитного поля в станине: на участке с индукцией B_{c1} на участке с индукцией B_{c2}	H_{c1} H_{c2}	А/м А/м	
18	Средняя напряженность магнитного поля в станине	$H_{c.c.p} = \frac{H_{c1} + H_{c2}}{2}$	А/м	
19	Магнитное напряжение участка станины	$F_c = H_{c.c.p} L_c$	А	
20	Сумма магнитных напряжений всех участков	$F_{d\Sigma} = F_{\Delta d} + F_Z + F_j + F_{c.d} + F_{\delta d2} + F_c$	А	
21	МДС обмотки добавочного полюса	$F_d = F_{d\Sigma} + \frac{A\tau}{2}$	А	

Средние значения J_d машин постоянного тока при исполнении по степени защиты IP44 могут быть приняты равными $(2 - 3) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$, при исполнении по степени защиты IP22 $(4,5 - 6,5) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Марку провода и тип обмотки добавочных полюсов выбирают согласно приложению 1. По выбранному стандартному сечению проводника уточняют плотность тока J_d .

После проверки размещения катушек главных и добавочных полюсов с учетом принятых припусков на разбухание катушек (см. § 10.7) определяют окончательные размеры витка катушки, м,

$$l_{д.ср} = 2(b_d + l_d) + \pi(b_{кт.д} + 2\Delta_{нз}), \quad (10.89)$$

где b_d и l_d — ширина и длина сердечника добавочного полюса; $b_{кт.д}$ — ширина катушки добавочного полюса; $\Delta_{нз}$ — односторонний размер зазора между сердечником добавочного полюса и катушкой с учетом изоляции сердечника: $\Delta_{нз} = (1,7 \div 2,2) \cdot 10^{-3}$ м при диаметрах якоря до 500 мм.

Сопротивление обмотки добавочного полюса в холодном состоянии, Ом,

$$R_d = \rho_{\text{ж}} \frac{2p_d l_{д.ср} w_d}{q_d a_d^2}. \quad (10.90)$$

Масса меди обмотки добавочных полюсов, кг,

$$m_d = 8900 l_{д.ср} w_d 2p_d q_d. \quad (10.91)$$

10.10. ПОТЕРИ И КПД. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Коэффициент полезного действия машины, %,

$$\eta = \frac{P_{\text{ном}}}{P_1} 100 = \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}} + \Sigma P} 100, \quad (10.92)$$

где $P_{\text{ном}}$ — номинальная полезная мощность машины, кВт; ΣP — сумма потерь в машине, кВт; P_1 — потребляемая мощность, кВт.

Сумма потерь в машине в общем случае, кВт,

$$\Sigma P = P_{\text{я.а}} + P_{\text{я.с}} + P_{\text{я.в}} + P_{\text{я.д}} + P_{\text{я.к}} + P_{\text{ш}} + \\ + P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}, \quad (10.93)$$

где $P_{\text{я.а}}$ — электрические потери в обмотке якоря; $P_{\text{я.с}}$ — то же в стабилизирующей обмотке; $P_{\text{я.в}}$ — то же в обмотке параллельного возбуж-

дения; $P_{\text{э.д}}$ — то же в обмотке добавочных полюсов; $P_{\text{э.к}}$ — то же в компенсационной обмотке; $P_{\text{щ}}$ — то же в переходном контакте щеток; $P_{\text{ст}}$ — магнитные потери в стали якоря; $P_{\text{мех}}$ — суммарные механические потери; $P_{\text{доб}}$ — добавочные потери.

Электрические потери в обмотке якоря, кВт,

$$P_{\text{э.а}} = I^2 R_a \cdot 10^{-3}. \quad (10.94)$$

Электрические потери в стабилизирующей обмотке, кВт,

$$P_{\text{э.с}} = I^2 R_c \cdot 10^{-3}. \quad (10.95)$$

Электрические потери в цепи обмотки параллельного возбуждения, кВт,

$$P_{\text{э.в}} = I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} \cdot 10^{-3} = \frac{U_{\text{в}}^2}{R_{\text{в}}} \cdot 10^{-3}. \quad (10.96)$$

Электрические потери в обмотке добавочных полюсов, кВт,

$$P_{\text{э.д}} = I^2 R_d \cdot 10^{-3}. \quad (10.97)$$

Электрические потери в компенсационной обмотке, кВт,

$$P_{\text{э.к}} = I^2 R_k \cdot 10^{-3}. \quad (10.98)$$

Электрические потери в переходном контакте щеток, кВт,

$$P_{\text{щ}} = 2 \Delta U_{\text{щ}} I \cdot 10^{-3}. \quad (10.99)$$

Значение $2 \Delta U_{\text{щ}}$ определяют для конкретной марки щеток по табл. П4.2.

Магнитные потери в стали зубцов и ярма якоря, кВт.

$$P_{\text{ст}} = 2,3 p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} (B_z^2 m_z + B_j^2 m_j). \quad (10.100)$$

Масса стали зубцов якоря с овальными пазами, кг,

$$m_z = 7800 Z b_z \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2} \right) l_{\delta} k_c. \quad (10.101)$$

Масса стали зубцов с прямоугольными пазами, кг,

$$m_z = 7800 Z b_{zcp} h_{\text{п}} l_{\delta} k_c. \quad (10.102)$$

Масса спинки ярма станины, кг,

$$m_j = 7800 \frac{\pi [(D - 2h_n)^2 + D_0^2]}{4} l_\delta k_c. \quad (10.103)$$

При наличии аксиальных каналов в спинке ярма необходимо уменьшить площадь сечения стали ярма на значение, равное площади поперечного сечения всех каналов.

Сумма механических потерь, кВт,

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{т.щ}} + P_{\text{вент}} + P_{\text{т.п}}, \quad (10.104)$$

где $P_{\text{т.щ}}$ — потери на трение щеток о коллектор; $P_{\text{вент}} + P_{\text{т.п}}$ — потери на вентиляцию и трение в подшипниках.

При принятых значениях удельного нажатия на щетку и коэффициенте трения щеток о коллектор, составляющем $f \approx 0,25$, потери на трение в щеточном контакте, кВт,

$$P_{\text{т.щ}} \approx 7,5 \Sigma S_{\text{щ}} v_k, \quad (10.105)$$

где $\Sigma S_{\text{щ}}$ — суммарная площадь контакта всех щеток, м^2 ; v_k — окружная скорость коллектора, м/с .

Средние значения потерь $P_{\text{вент}} + P_{\text{т.п}}$ можно определить по рис. 10.28. Семейство кривых *А* на этом рисунке относится к машинам с вентиляторами, установленными на валу машины, семейство кривых *Б* — к машинам, приводные двигатели вентиляторов которых не установлены на машинах.

Добавочные потери при номинальной нагрузке, кВт:

для некомпенсированных машин

$$P_{\text{доб}} = 0,01 \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}; \quad (10.106)$$

для компенсированных машин

$$P_{\text{доб}} = 0,005 \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}, \quad (10.107)$$

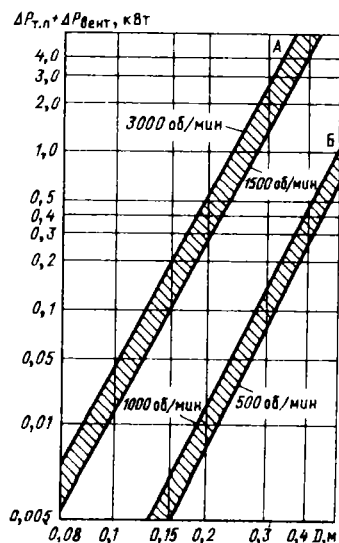


Рис. 10.28. Потери на вентиляцию и трение в подшипниках

где $\eta_{\text{ном}}$ — предварительное значение КПД по рис. 10.7. При номинальной нагрузке КПД определяют в следующем порядке. Задают значения тока якоря $I = 0,1 I_{\text{ном}}$; $I = 0,25 I_{\text{ном}}$; $I = 0,5 I_{\text{ном}}$; ...; $I = I_{\text{ном}}$; $I \approx 1,25 I_{\text{ном}}$.

Для каждого значения тока определяют мощность, кВт,

$$P_1 = U_{\text{ном}} I \cdot 10^{-3} + U_{\text{в.ном}} I_{\text{в.ном}} \cdot 10^{-3}. \quad (10.108)$$

Рассчитывают суммарные потери ΣP . Для каждого значения тока определяют полезную мощность на валу P_2 и по (10.92) КПД.

Строят зависимости $P_2 = f(I)$, $\eta = \varphi(I)$ и для номинального значения $P_{2\text{ном}}$ определяют номинальное значение тока якоря $I_{\text{ном}}$ и номинальный КПД $\eta_{\text{ном}}$.

Электромагнитная мощность при номинальном значении тока якоря

$$P' = P_1 - P_{\text{за}} - P_{\text{э.с}} - P_{\text{э.д}} - P_{\text{э.к}} - P_{\text{ш}}. \quad (10.109)$$

Номинальное значение ЭДС, В,

$$E_{\text{ном}} = P' / I_{\text{ном}}. \quad (10.110)$$

Номинальное значение магнитного потока $\Phi_{\delta\text{ном}}$ и суммарную МДС $F_{\Sigma\text{ном}}$ определяют по характеристике холостого хода машины; по переходной характеристике рассчитывают размагничивающее действие реакции якоря F_{qd} .

Номинальная частота вращения, об/мин,

$$n_{\text{ном}} = \frac{60 E_{\text{ном}}}{(p/a) N \Phi_{\delta\text{ном}}}. \quad (10.111)$$

Номинальный ток обмотки параллельного возбуждения, А,

$$I_{\text{в.ном}} = (F_{\Sigma} - F_{\text{с}} + F_{qd}) / w_{\text{в}}. \quad (10.112)$$

Вращающий момент на валу двигателя, Н·м,

$$M = 9,57 \cdot 10^3 P_2 / n. \quad (10.113)$$

Ток двигателя, А,

$$I_{1\text{ном}} = I_{\text{ном}} + I_{\text{в.ном}}. \quad (10.114)$$

Зависимости M , n , η , I от полезной мощности на валу определяют рабочие характеристики двигателя.

При расчете рабочих характеристик генераторов принимается частота вращения якоря $n = \text{const}$ [14].

Напряжение на выводах генератора, U , определяется из основного уравнения напряжения

$$U = E - I(R_a + R_k + R_c + R_d) - 2\Delta U_{щ}, \quad (10.115)$$

где E — ЭДС обмотки якоря; R_a, R_k, R_c, R_d — сопротивления, определяются по (10.25), (10.48), (10.60), (10.90) соответственно; $2\Delta U_{щ}$ — падение напряжения в щеточном контакте, принимается согласно приложению 4.

Однако E в (10.115) является сложной функцией тока якоря I , тока возбуждения I_b и состояния магнитной цепи машины. Для определения ЭДС E необходимо задаться током возбуждения I_b и током якоря I , рассчитать результирующую МДС:

$$F_{\Sigma} = F_b - F_{qd} \pm F_d + F_c. \quad (10.116)$$

Далее по характеристике намагничивания определяется ЭДС E .

Если при указанных расчетах напряжение на выводах генератора $U = \text{const}$, а рассчитывается зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_b = f(I)$, то полученная характеристика называется регулировочной.

Если принимается полное сопротивление в цепи обмотки возбуждения $r_{b\Sigma} = \text{const}$ и определяется зависимость напряжения на выводах машины от тока нагрузки: $U = f(I)$, то полученная характеристика является внешней характеристикой генератора. В этом случае МДС в (10.116)

$$F_b = \frac{U}{r_{b\Sigma}} w_b,$$

где w_b — число витков обмотки возбуждения.

Путем расчета серии внешних характеристик для нескольких значений $r_{b\Sigma}$ можно построить нагрузочную характеристику, дающую зависимость напряжения U на выводах машины от тока возбуждения I_b для принятого значения тока нагрузки [14].

10.11. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО И ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТОВ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Тепловой и вентиляционный расчеты машин постоянного тока основываются на общих принципах расчета тепловых и вентиляционных схем электрических машин, изложенных в гл. 7.

Для приближенной оценки тепловой напряженности машины постоянного тока достаточно определить превышения температуры отдельных активных частей ее при выбранных электромагнитных нагрузках и геометрических размерах. В этом случае можно использовать приближенные методики тепловых и вентиляционных расчетов.

Обычно рассчитывают средние превышения температуры обмоток якоря, возбуждения, добавочных полюсов и компенсационной, а также поверхности коллектора.

Эти превышения температуры с учетом приближенного расчета должны быть ниже предельных допускаемых значений, установленных ГОСТ 183-74, не менее чем на 10 %.

При расчете средних превышений температуры активных частей машины сопротивления обмоток приводят к предельным допускаемым температурам для выбранного класса нагревостойкости изоляции. Для этого сопротивления, вычисленные при расчете рабочих характеристик, необходимо умножить на коэффициент k_T . При классе нагревостойкости изоляции В $k_T = 1,15$, при классе нагревостойкости F $k_T = 1,07$, при классе нагревостойкости H $k_T = 1,145$.

Вентиляционный расчет машин постоянного тока также выполняют с использованием средних аэродинамических сопротивлений и конструктивных размеров вентиляционных устройств серийных машин.

Для теплового и вентиляционного расчетов машины необходимо установить мощности тепловых потоков, площади отдельных поверхностей и коэффициенты теплоотдачи с этих поверхностей.

Потери мощности в обмотках с учетом поправочного коэффициента k_T , Вт, составляют:

$$P_{a.T} = k_T I_{\text{ном}}^2 R_a - \text{в обмотке якоря};$$

$$P_{д.т} = k_T I_{\text{ном}}^2 R_{д} - \text{в обмотке добавочных полюсов};$$

$$P_{к.т} = k_T I_{\text{ном}}^2 R_{к} - \text{в компенсационной обмотке};$$

$$P_{с.т} = k_T I_{\text{ном}}^2 R_{с} - \text{в стабилизирующей обмотке};$$

$$P_{в.т} = k_T I_{\text{ном}}^2 R_{в} - \text{в обмотке возбуждения}.$$

Расчетные значения потерь в обмотках принимают при номинальных токах якоря и возбуждения.

Для расчета потерь, отводимых охлаждающим внутренними объемами машины воздухом и внешней поверхностью машины, принимают, что через внешнюю поверхность отводится часть потерь обмоток возбуждения, стабилизирующей, добавочных полюсов и компенсационной, равная: при исполнении по степеням защиты IP22, IP44 и способам охлаждения IC01, IC17, IC37

$$P_{вн} = 0,1 (P_{в.т} + P_{с.т} + P_{д.т} + P_{к.т}); \quad (10.117)$$

при исполнениях IP44, IC0041

$$P_{вн} = 0,3 (P_{в.т} + P_{с.т} + P_{д.т} + P_{к.т}); \quad (10.118)$$

при исполнениях IP44, IC0141

$$P_{\text{вн}} = 0,4(P_{\text{в.т}} + P_{\text{с.т}} + P_{\text{д.т}} + P_{\text{к.т}}). \quad (10.119)$$

Потери, отводимые охлаждающим воздухом из внутреннего объема машины, составляют:

$$\Sigma P' = \Sigma P - P_{\text{вн}}, \quad (10.120)$$

где $\Sigma P = P_1 - P_{\text{ном}}$, а при исполнении по степени защиты IP44

$$\Sigma P = P_1 - P_{\text{ном}} - \Delta(P_{\text{т.л}} + P_{\text{вент}}).$$

Соответственно потери P'_i , отводимые охлаждающим воздухом из внутреннего объема машины через поверхность i -й обмотки главных и добавочных полюсов, в зависимости от исполнения машины и системы охлаждения согласно (10.117) – (10.118) составляют $0,9P_i$; $0,7P_i$; $0,6P_i$.

При расчете среднего превышения температуры компенсационной обмотки необходимо учесть и добавочные потери, возникающие в полюсных наконечниках главных полюсов вследствие зубчатости наконечников. Эти потери ориентировочно равны, Вт:

$$P_{\text{ст.л}} = k_{\Delta} [(k_{\delta_{\text{к}}} - 1) B_{\delta} t_{\text{к}}]^2 \left(\frac{Zn}{10^4} \right)^{1,5} \frac{2pb_{\text{г}}l_{\text{г}}}{10^6}, \quad (10.121)$$

где kL — коэффициент, зависящий от толщины листа стали главного полюса; $k_{\Delta} = 1,5$ при толщине листа 0,5 мм, $k_{\Delta} = 2,8$ при толщине листа 1 мм и $k_{\Delta} = 4$ при толщине листа 1,5 мм; $k_{\delta_{\text{к}}}$ — коэффициент воздушного зазора полюсного наконечника; $t_{\text{к}}$ — зубцовый шаг паза компенсационной обмотки; $b_{\text{г}}$, $l_{\text{г}}$ — ширина и длина полюсного наконечника главного полюса.

Расчетные поверхности охлаждения тепловыделяющих поверхностей якоря обмоток главных и добавочных полюсов зависят от выбранной системы охлаждения (радиальной или аксиальной) и формы и размеров охлаждающих каналов, образованных поверхностями охлаждения обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов.

При тепловом расчете принимают следующие формулы для расчета поверхностей охлаждения.

Поверхность охлаждения якоря, м^2 :
при аксиальной вентиляции

$$S_a = (\pi D + n_{\text{к}} d_{\text{к}}) (l_a - 0,5 \Sigma l_6), \quad (10.122)$$

где $n_{\text{к}}$, $d_{\text{к}}$ — число и диаметр аксиальных вентиляционных каналов якоря; Σl_6 — общая длина (по длине якоря) бандажа;

при радиальной вентиляции

$$S_a = \pi D(l_a - 0,5 \Sigma l_{\delta} - n_p b_p), \quad (10.123)$$

где n_p , b_p — число и ширина радиальных вентиляционных каналов.

Поверхность охлаждения пазовой части обмотки якоря и компенсационной обмотки, м^2 ,

$$S_{\Pi} = \Pi Z l_{\delta} k_c, \quad (10.124)$$

где Π — периметр поперечного сечения паза: для овального полузакрытого паза $\Pi = \pi(r_1 + r_2) + 2h_1$, для прямоугольного открытого паза $\Pi = 2(b_{\Pi} + h_{\Pi})$; $l_{\delta} k_c$ — длина магнитопровода якоря (главного полюса — для компенсационной обмотки).

Поверхность охлаждения наружной поверхности лобовых частей обмотки якоря, м^2 ,

$$S_{\Pi} = 2\pi D(l_{\text{выл}} - 0,3l_{\text{б.л}}), \quad (10.125)$$

где $l_{\text{выл}}$ — длина вылета лобовой части обмотки якоря: $l_{\text{выл}} = 0,3\tau$ при $2p = 2$ и $l_{\text{выл}} \approx 0,4\tau$ при $2p \geq 4$; $\Sigma l_{\text{б.л}}$ — полная ширина бандажа лобовой части обмотки.

Поверхность изоляции лобовых частей обмотки якоря, м^2 ,

$$2S_{\text{изл}} = 2Z \Pi_{\text{изл}} l_{\Pi}, \quad (10.126)$$

где $\Pi_{\text{изл}}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части; для овального полузакрытого паза $\Pi_{\text{изл}} = (1 + \pi/2)(r_1 + r_2) + h_1$; для прямоугольного открытого паза $\Pi_{\text{изл}} = 2(b_{\Pi} + h_{\Pi})$; l_{Π} — длина лобовой части обмотки якоря, м.

Поверхность охлаждения лобовой части компенсационной обмотки, м^2 :

для стержневой обмотки

$$S_{\text{к.л}} = 2p N_{\text{к}} l_{\text{к.л}} (b_{\text{д}} + h_{\text{д}}); \quad (10.127)$$

для катушечной (секционной) обмотки

$$S_{\text{к.л}} = 2p Z_{\text{к}} l_{\text{к.л}} (2b_{\text{к.л}} + h_{\text{к.л}}/2), \quad (10.128)$$

где $N_{\text{к}}$ — число стержней компенсационной обмотки на один полюс; $b_{\text{к.л}}$, $h_{\text{к.л}}$ — ширина и высота дуги компенсационной обмотки; $b_{\text{к.л}}$, $h_{\text{к.л}}$ — ширина и высота паза компенсационной обмотки.

Поверхность охлаждения обмотки возбуждения, м^2 ,

$$S_{\text{в}} = l_{\text{в.ср}} \Pi_{\text{в}}, \quad (10.129)$$

где $l_{\text{в.ср}}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения; $\Pi_{\text{в}}$ — периметр

поперечного сечения условной поверхности охлаждения обмотки возбуждения. Для определения периметра Π по эскизу межполюсного окна определяют длины участков контура поперечного сечения обмотки; поверхности, прилегающие к сердечнику главного полюса, не учитываются; поверхности, обращенные к каналам шириной менее 6 мм, учитываются с коэффициентом 0,5; поверхности, прилегающие к изоляционным рамкам, учитываются с коэффициентом 0,3.

Поверхность охлаждения обмотки добавочных полюсов, м^2 ,

$$S_{\text{д}} = l_{\text{д.ср}} \Pi_{\text{д}}, \quad (10.130)$$

где расчет периметра $\Pi_{\text{д}}$ — поперечного сечения условной поверхности охлаждения добавочного полюса — производят так же, как и для обмотки возбуждения.

Поверхность охлаждения коллектора, м^2 ,

$$S_{\text{кол}} = \pi D_{\text{к}} l_{\text{к}}, \quad (10.131)$$

где $D_{\text{к}}$ и $l_{\text{к}}$ — диаметр и длина коллектора.

Расчетное значение внешней поверхности охлаждения двигателя, м^2 ,

$$S_{\text{охл}} = \pi D_{\text{вн}} (l_{\delta} + 2l_{\text{выл}}), \quad (10.132)$$

где $D_{\text{вн}}$ — внешний диаметр станины, м; $l_{\text{выл}}$ — вылет лобовых частей обмотки якоря, м.

Коэффициент теплоотдачи с поверхности твердого тела зависит от характера течения охлаждающей среды, омывающей поверхность, конфигурации и размеров поверхности, характера покрытия и т.д.

Средние значения коэффициентов теплоотдачи с расчетных поверхностей машин постоянного тока приведены на рис. 10.29 — 10.32.

Превышение температуры поверхности магнитопровода якоря над температурой воздуха внутри машины, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta \vartheta_{\text{а}} = \frac{P_{\text{ат}} \left(\frac{2l_{\delta}}{l_{\text{асг}}} \right) + P_{\text{ст}}}{S_{\text{а}} \alpha_{\text{а}}}, \quad (10.133)$$

где $\alpha_{\text{а}}$ — коэффициент теплоотдачи по рис. 10.29.

Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей якоря, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta \vartheta_{\text{пов.л}} = \frac{P_{\text{ат}} \left(1 - \frac{2l_{\delta}}{l_{\text{аср}}} \right)}{2S_{\text{л}} \alpha_{\text{л}}}. \quad (10.134)$$

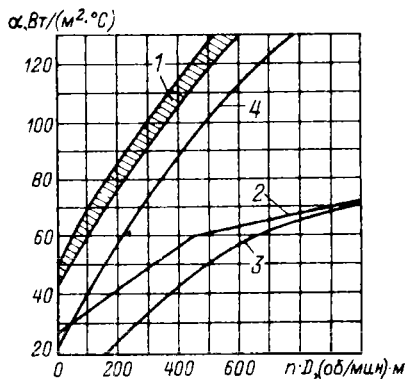


Рис. 10.29. Коэффициенты теплоотдачи с поверхностями при аксиальной вентиляции:

1 – якоря и лобовых частей обмоток якоря при исполнениях IP22 и IP44; 2 – обмоток добавочных полюсов и параллельного возбуждения; 3 – дуг компенсационной обмотки; 4 – полюсного наконечника главного полюса, обращенного к воздушному зазору

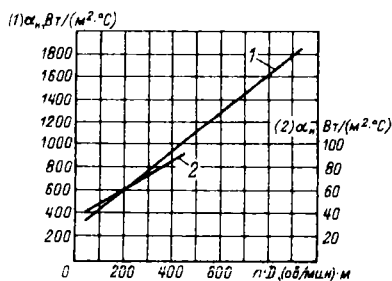


Рис. 10.30. Минимальные значения коэффициента подогрева воздуха при исполнении и способах охлаждения машины:

1 – IP22 (IC01, IC37), IP44, IC37 при $D_{вн} < 0,6$ м; 2 – IP44, IC0141 при $D_{вн} < 0,22$ м

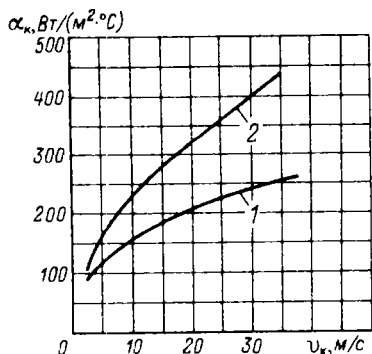


Рис. 10.31. Коэффициенты теплоотдачи с поверхности коллектора:

1 – без аксиальных каналов; 2 – с аксиальными каналами

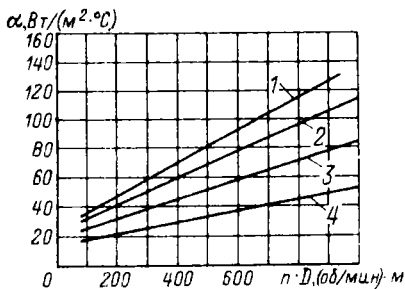


Рис. 10.32. Коэффициенты теплоотдачи с поверхностями при радиальной вентиляции:

1 – якоря и лобовых частей обмоток якоря; 2 – полюсного наконечника главного полюса в воздушный зазор; 3 – обмоток параллельного возбуждения и добавочных полюсов; 4 – дуг компенсационной обмотки

Перепад температуры в изоляции паза обмотки якоря для овальных полузакрытых пазов, °C,

$$\Delta\vartheta_{\text{нз.п}} = \frac{P_{\text{ат}} \left(\frac{2l_a}{l_{\text{аср}}} \right)}{S_{\text{п}}} \left(\frac{r_1 + r_2}{8\lambda'_{\text{экр}}} + \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{экр}}} \right), \quad (10.135)$$

где r_1 и r_2 — размеры паза; $\lambda'_{\text{экр}}$ — эквивалентная теплопроводность внутренней изоляции секции из круглого провода: $\lambda'_{\text{экр}} \approx \approx 1,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $\lambda_{\text{экр}}$ — эквивалентная теплопроводность изоляции: для классов нагревостойкости В, F, H $\lambda_{\text{экр}} = 0,16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

для открытых прямоугольных пазов составляющая $(r_1 + r_2)/(8\lambda'_{\text{экр}}) = 0$.

Перепад температуры в изоляции лобовых частей обмотки якоря, °C,

$$\Delta\vartheta_{\text{нз.л}} = \frac{P_{\text{ат}} \left(1 - \frac{2l_a}{l_{\text{аср}}} \right)}{S_{\text{пл}}} \left(\frac{h_{\text{п}}}{8\lambda'_{\text{экр}}} + \frac{b_{\text{нз}}}{\lambda_{\text{экр}}} \right), \quad (10.136)$$

где $h_{\text{п}}$ — высота паза; для якорей с жесткими секциями из прямоугольного провода $h_{\text{п}}/(8\lambda_{\text{экр}}) \approx 0$; для якорей со вспятыми обмотками без общей изоляции лобовых частей секции $\Delta b_{\text{нз}}/\lambda_{\text{экр}} \approx 0$.

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой охлаждающей среды, °C,

$$\Delta\vartheta_{\text{воз}} = \Sigma P'/(S_{\text{охл}} \alpha_{\text{н}}), \quad (10.137)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ — коэффициент подогрева воздуха (рис. 10.30).

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды, °C,

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{\text{аср}} = & (\Delta\vartheta_{\text{а}} + \Delta\vartheta_{\text{нз.п}}) \frac{2l_{\delta}}{l_{\text{аср}}} + \\ & + (\Delta\vartheta_{\text{пов.л}} + \Delta\vartheta_{\text{нз.л}}) \left(1 - \frac{2l_a}{l_{\text{аср}}} \right) + \Delta\vartheta_{\text{воз}}. \end{aligned} \quad (10.138)$$

Превышение температуры наружной поверхности обмотки возбуждения, °C,

$$\Delta\vartheta_{\text{в}} = P'_{\text{в}}/(2p S_{\text{в}} \alpha_{\text{в}}), \quad (10.139)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки возбуждения (рис. 10.29).

Расчет $P'_в$ в зависимости от исполнения машины и системы охлаждения приведен выше.

Перепад температуры в изоляции многослойной катушки обмотки возбуждения, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta\vartheta_{из.в} = \frac{P'_в}{2pS_в} \left(\frac{b_в}{8\lambda'_{эkv}} + \frac{\Delta b_{из.в}}{\lambda_{эkv}} \right), \quad (10.140)$$

где $b_в$ — средняя ширина катушки; $\lambda'_{эkv}$ и $\lambda_{эkv}$ принимаются такими же, как и для изоляции обмотки якоря: $\lambda'_{эkv} = 1,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, $\lambda_{эkv} = 0,16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Для катушек возбуждения, выполненных из проводов прямоугольного сечения, составляющая $b_в/8\lambda'_{эkv} \approx 0$.

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta\vartheta_{в.ср} = \Delta\vartheta_в + \Delta\vartheta_{из.в} + \Delta\vartheta_{воз}. \quad (10.141)$$

Превышение температуры наружной поверхности обмотки добавочных полюсов над температурой воздуха внутри машины, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta\vartheta_{п.д} = P'_{д.т}/(2p_d S_d a_d),$$

где a_d — коэффициент теплоотдачи с поверхности добавочного полюса: $a_d = a_в$.

Перепад температуры в изоляции многослойной обмотки добавочного полюса, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta\vartheta_{из.д} = \frac{P'_{д.т}}{2p_d S_d} \left(\frac{b_{кт.д}}{8\lambda'_{эkv}} + \frac{\Delta b_{из.д}}{\lambda_{эkv}} \right), \quad (10.142)$$

где $b_{кт.д}$ — ширина обмотки добавочного полюса; $\lambda'_{эkv}$ и $\lambda_{эkv}$ принимаются такими же, как и для изоляции обмотки якоря с полузакрытыми пазами; $\Delta b_{из.д} = 0$ для обмоток из прямоугольного провода.

Среднее превышение температуры обмотки добавочных полюсов над температурой охлаждающей среды, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta\vartheta_{д.ср} = \Delta\vartheta_д + \Delta\vartheta_{из.д} + \Delta\vartheta_{воз}. \quad (10.143)$$

Превышение температуры поверхности полюсного наконечника главного полюса, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta\vartheta_{т.п} = \frac{P_{к.т} \left(\frac{2l_{\Gamma}}{l_{к.ср}} \right) + P_{ст.п}}{2pb_{\Gamma} l_{\Gamma} a_{\Gamma.п}}, \quad (10.144)$$

где $a_{г.л}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности главного полюса (рис. 10.29); $b_{г.}$, $l_{г.}$ — ширина и длина полюсного наконечника главного полюса, м.

Перепад температуры в пазовой изоляции компенсационной обмотки, °C,

$$\Delta\vartheta_{из.к} = \frac{P_{к.т} \frac{2l_{г.}}{l_{к.ср}} \Delta b_{из.к}}{2p Z_k^2 (b_{к.л} + h_{к.л}) l_{г.} \lambda_{экв}}, \quad (10.145)$$

где $\Delta b_{из.к}$ — толщина пазовой изоляции компенсационной обмотки (см. табл. 10.13); $b_{к.л}$, $h_{к.л}$ — ширина и высота паза компенсационной обмотки.

Превышение температуры лобовой части компенсационной обмотки над температурой воздуха внутри машины, °C,

$$\Delta\vartheta_{к.л} = \frac{P_{к.т} \left(1 - \frac{2l_{г.}}{l_{к.ср}}\right)}{S_{к.л} a_{д.к}}, \quad (10.146)$$

где $a_{д.к}$ — коэффициент теплоотдачи дуг компенсационной обмотки (рис. 10.29).

Среднее превышение температуры компенсационной обмотки над температурой охлаждающего воздуха, °C,

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{к.ср} &= (\Delta\vartheta_{к.л} + \Delta\vartheta_{из.к}) \frac{2l_{к.}}{l_{к.ср}} + \\ &+ \Delta\vartheta_{к.л} \left(1 - \frac{2l_{г.}}{l_{к.ср}}\right) + \Delta\vartheta_{воз}. \end{aligned} \quad (10.147)$$

Превышение температуры поверхности коллектора над температурой воздуха внутри машины, °C,

$$\Delta\vartheta_{к} = \Delta(P_{щ} + P_{т.щ}) / (S_{к} a_{к}), \quad (10.148)$$

где $a_{к}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности коллектора (по рис. 10.31); потери в щеточном контакте определены при расчете рабочих характеристик машины.

Среднее превышение температуры коллектора над температурой охлаждающей среды, °C:

при входе охлаждающего воздуха со стороны, противоположной коллектору,

$$\Delta\vartheta_{\text{к.ср}} = \Delta\vartheta_{\text{к}} + 2\Delta\vartheta_{\text{воз}}; \quad (10.149)$$

при входе охлаждающего воздуха со стороны коллектора

$$\Delta\vartheta_{\text{к.ср}} = \Delta\vartheta_{\text{к}} + \Delta\vartheta_{\text{воз}}. \quad (10.150)$$

Расход воздуха, необходимый для охлаждения машины, м³/с,

$$Q_{\text{воз}} = \Sigma P' / (1100 \cdot 2\Delta\vartheta_{\text{воз}}), \quad (10.151)$$

где $\Sigma P'$ определяется согласно (10.120); $\Delta\vartheta_{\text{воз}}$ — среднее превышение температуры воздуха внутри машины; при вентиляционном расчете принимается, что превышение температуры выходящего из машины воздуха над входящим в 2 раза больше среднего превышения температуры $\Delta\vartheta_{\text{воз}}$, т.е. $\vartheta_{\text{вых}} - \vartheta_{\text{вх}} = 2\Delta\vartheta_{\text{воз}}$.

Давление вентилятора, Па, необходимое для обеспечения заданного расхода воздуха $Q_{\text{воз}}$,

$$H = ZQ_{\text{воз}}^2, \quad (10.152)$$

где Z — эквивалентное аэродинамическое сопротивление вентиляционного тракта машины; средние значения Z приведены на рис. 75.

Аэродинамическая характеристика вентиляционной системы машины с вентиляторами центробежного типа описывается квадратичной параболой:

$$H = H_0 [1 - (Q_{\text{воз}}/Q_{0\text{воз}})^2], \quad (10.153)$$

где H_0 — давление, создаваемое вентилятором в режиме холостого хода ($Q_{\text{воз}} = 0$); $Q_{0\text{воз}}$ — расход вентилятора в режиме короткого замыкания (при работе вентилятора в атмосфере $H = 0$).

При аксиальной системе вентиляции наружный диаметр центробежного вентилятора, м,

$$D_2 \approx 0,9d_c, \quad (10.154)$$

где d_c — внутренний диаметр станины, м.

Внутренний диаметр колеса вентилятора, м,

$$D_1 = (1,25 \div 1,3) D, \quad (10.155)$$

где D — диаметр якоря.

Ширина лопаток вентилятора

$$b_{\text{л.в}} = (0,12 \div 0,15) D_2. \quad (10.156)$$

Число лопаток вентилятора выбирается согласно формуле (6.131).

Давление в режиме холостого хода, Па,

$$H_0 = \eta_{a0} \rho (v_2^2 - v_1^2), \quad (10.157)$$

где $\eta_{a0} \approx 0,6$ – КПД вентилятора в режиме холостого хода;

$$v_2 = (\pi D_2 n)/60; \quad v_1 = (\pi D_1 n)/60.$$

Расход воздуха в режиме короткого замыкания $Q_{в max}$, м³/с,

$$Q_{в max} = 0,42 v_2 S_2, \quad (10.158)$$

где $S_2 = 0,92 \pi D_2 b_{л.в.}$.

Действительный расход воздуха $Q_{в оз}$ при известных значениях H_0 , H , $Q_{в max}$ определяется согласно (10.152) и (10.153), м³:

$$Q_{в оз} = Q_{в max} \sqrt{H_0 / (H_0 + Z Q_{в max})}. \quad (10.159)$$

Действительный расход воздуха, рассчитанный по (10.159), должен быть равен необходимому расходу (10.151). Если это равенство не обеспечивается, то путем изменения ширины вентилятора $b_{л.в.}$ и диаметров D_2 и D_1 , необходимо обеспечить требуемый расход воздуха.

Мощность, потребляемая вентилятором, Вт,

$$P_{вен} = H Q_{в оз} / \eta_э, \quad (10.160)$$

где $\eta_э = 0,18 \div 0,2$ – энергетический КПД вентилятора.

При радиальной системе вентиляции, выполняемой в основном в тихоходных машинах большой мощности (тысячи киловатт), вентиляционный расчет проводят по полной схеме аэродинамических потоков, охлаждающих машину. Методика указанных расчетов изложена в гл. 7. Коэффициенты теплоотдачи с поверхностей активных частей машины при радиальной системе вентиляции приведены на рис. 10.32.

Пример расчета двигателя постоянного тока

Задание на проект и исходные данные

Рассчитать двигатель постоянного тока со следующими данными:

мощность $P_{ном} = 11$ кВт;

номинальное напряжение сети $U_{ном} = 220$ В;

номинальная частота вращения $n_{ном} = 1500$ об/мин;

высота оси вращения $h = 160 \cdot 10^{-3}$ м;

возбуждение параллельное без стабилизирующей обмотки;

исполнение по степени защиты IP22, по способу охлаждения – самовентиляция (IC01);

режим работы – продолжительный;

изоляция класса нагревостойкости В.

Конструкция двигателя должна соответствовать требованиям ГОСТ на установочные размеры и размеры выступающего конца вала (ГОСТ 13267-73), а также общим техническим требованиям на машины электрические (ГОСТ 183-74). За основу конструкции принимается машина постоянного тока серии 2П.

В дополнительном задании можно предусмотреть расчет стабилизирующей обмотки возбуждения, методика расчета которого приведена в гл. 10.

Выбор главных размеров

1. Предварительное значение КПД двигателя выбираем по рис. 10.7: $\eta = 84\%$.

2. Ток двигателя (предварительное значение)

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot 10^3 / (\eta U_{\text{ном}}) = 11 \cdot 10^3 / (0,84 \cdot 220) = 59,5 \text{ А.}$$

3. Ток якоря

$$I_{\text{ном}} = (1 - k_{\text{в}}) I_{\text{ном}} = 0,965 \cdot 59,5 = 57,42 \text{ А,}$$

где $k_{\text{в}} = 0,035$ по табл. 10.8.

4. Электромагнитная мощность по (10.2)

$$P' = P_{\text{ном}} + \frac{100 + \eta}{2\eta} = 11\,000 + \frac{100 + 84}{2 \cdot 84} = 12\,048 \text{ Вт.}$$

5. Диаметр якоря согласно § 10.3 $D = 0,156 \text{ м.}$

6. Выбираем линейную нагрузку якоря по рис. 10.9

$$A = 2 \cdot 10^4 \text{ А/м.}$$

7. Индукция в воздушном зазоре по рис. 10.10

$$B_{\delta} = 0,68 \text{ Тл.}$$

Расчетный коэффициент полюсной дуги по рис. 10.8

$$\alpha_{\delta} = 0,62.$$

8. Расчетная длина якоря

$$l_{\delta} = \frac{6,1 \cdot P'}{\alpha_{\delta} A B_{\delta} D^2 n_{\text{ном}}} = \frac{6,1 \cdot 12\,048}{0,62 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0,68 \cdot (0,156)^2 \cdot 1500} = 0,237 \text{ м.}$$

9. Отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру

$$\lambda = l_{\delta} / D = 0,237 / 0,156 = 1,52.$$

10. Число полюсов принимаем $2p = 4$.

11. Полюсное деление

$$\tau = \pi D / 2p = \pi \cdot 0,156 / 4 = 0,122 \text{ м.}$$

12. Расчетная ширина полюсного наконечника

$$b_{\delta} = \alpha_{\delta} \tau = 0,62 \cdot 0,122 = 76 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

13. Действительная ширина полюсного наконечника при эксцентричном зазоре равна расчетной ширине:

$$b_p = b_{\delta} = 76 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Выбор обмотки якоря

14. Ток параллельной ветви

$$I_a = I / (2a) = 57,4 / 2 = 28,7 \text{ А.}$$

15. Выбираем простую волновую обмотку с числом параллельных ветвей $2a = 2$.

16. Предварительное общее число эффективных проводников по (10.4)

$$N = \frac{\pi D A}{I_a} = \frac{\pi \cdot 0,156 \cdot 20 \cdot 10^3}{28,7} = 342.$$

17. Крайние пределы чисел пазов якоря с использованием (10.5)

$$Z_{\min} = \frac{\pi D}{t_{Z1 \max}} = \frac{\pi \cdot 0,156}{(2 \cdot 10^{-2})} = 24;$$

$$Z_{\max} = \frac{\pi D}{t_{Z1 \min}} = \frac{\pi \cdot 0,156}{1 \cdot 10^{-2}} = 49.$$

Принимаем $Z = 29$; $t_{Z1} = \pi D / Z = 16,9 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

18. Число эффективных проводников в пазу

$$N_{\Pi} = N / Z = 342 / 29 = 11,79 = 12,$$

принимаем целое четное число $N_{\Pi} = 12$, тогда

$$N = N_{\Pi} Z = 12 \cdot 29 = 348.$$

19. Выбираем паз полузакрытый овальной формы с параллельными сторонами зуба.

20. Число коллекторных пластин K для различных значений $u_{\Pi} = K / Z$ выбираем, сравнивая три варианта:

№ варианта	u_{Π}	$K = u_{\Pi} Z$	$w_c = \frac{N}{2K}$	$U_{\text{к.ср}}, \text{В}$
1	1	29	6	30,4
2	2	58	3	15,2
3	3	87	2	10,1

Поскольку напряжение между двумя соседними коллекторными пластинами $U_{\text{к.ср}} = 2pU / K$ должно быть в пределах, не превышающих 15–16 В, принимаем вариант 3; в этом случае обмотка имеет целое число витков в секции $w_c = 2$, число коллекторных пластин $K = 87$, число эффективных проводников в пазу $N_{\Pi} = 12$, число секций в обмотке якоря $N_c = N / (2w_c) = 348 / 4 = 87$.

21. Уточняем линейную нагрузку:

$$A = N I_a / \pi D = 348 \cdot 28,7 / (\pi \cdot 0,156) = 20\,379 \text{ А/м.}$$

22. Корректируем длину якоря:

$$l_{\delta} = 0,237 \frac{20\,000}{20\,379} = 0,232 \text{ м.}$$

23. Наружный диаметр коллектора при полузакрытых пазах (10.7)

$$D_{\kappa} = (0,65 \div 0,8D) = (0,65 \div 0,80) 156 \cdot 10^{-3} = (94 \div 125) \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

По таблице предпочтительного ряда чисел (см. § 10.4) принимаем диаметр коллектора

$$D_{\kappa} = 125 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

24. Окружная скорость коллектора

$$v_{\kappa} = \frac{\pi D_{\kappa} n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,125 \cdot 1500}{60} = 9,8 \text{ м/с.}$$

25. Коллекторное деление

$$t_{\kappa} = \pi D_{\kappa} / K = \pi \cdot 0,125 / 87 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

26. Полный ток паза

$$I_{\Pi} = \frac{\pi D A}{Z} = \frac{\pi \cdot 0,156 \cdot 20\,379}{29} = 344,4 \text{ А.}$$

27. Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря

$$J_a = AJ_a / A = 1,6 \cdot 10^{11} / 20\,379 = 7,85 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2,$$

где AJ_a предварительно выбираем по рис. 10.11.

28. Предварительное сечение эффективного провода по (10.9)

$$q = I_a / J_a = 28,7 / (7,85 \cdot 10^6) = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Принимаем вспяную обмотку с круглыми проводниками и числом проводников, равным двум: марка провода ПЭТВ (см. табл. ПЗ.1), диаметр неизолированного провода $d_{\Gamma} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, диаметр изолированного провода $d_{\text{из}} = 1,685 \times 10^{-3} \text{ м}$, сечение провода $2,011 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, сечение эффективного проводника обмотки якоря $q = n_{\text{эл}} q_{\text{эл}} = 2 \cdot 2,011 \cdot 10^{-6} = 4,022 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Расчет геометрии зубцовой зоны

29. Сечение полузакрытого паза (за вычетом сечения пазовой изоляции и пазового клина) при предварительно принятом коэффициенте заполнения паза $k_3 = 0,68 \div 0,72$ по (10.21)

$$S_0 = \frac{N_{\Pi} n_{\text{эл}} d_{\text{из}}^2}{k_3} = \frac{12 \cdot 2 (1,685 \cdot 10^{-3})^2}{0,72} = 94,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

30. Высота паза (предварительно по рис. 10.13)

$$h_{\Pi} = 22 \text{ мм,}$$

высота шлица паза $h_{\text{ш}} = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м, ширина шлица $b_{\text{ш}} = 3 \cdot 10^{-3}$ м.

31. Ширина зубца по (10.11)

$$b_Z = \frac{B_{\delta}^t Z_1}{B_Z k_c} = \frac{0,68 \cdot 16,9 \cdot 10^{-3}}{1,95 \cdot 0,95} = 6,2 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

где $B_Z = 1,95$ Тл — допустимое значение индукции в стали зубца по табл. 10.9 при частоте переманичивания стали зубцов

$$f = p\eta/60 = 2 \cdot 1500/60 = 50 \text{ Гц};$$

$k_c = 0,95$ — коэффициент заполнения магнитопровода якоря сталью по табл. 2.1.

32. Большой радиус по (10.14)

$$r_1 = \frac{\pi(D - 2h_{\text{ш}}) - Zb_Z}{2(\pi + Z)} =$$
$$= \frac{\pi(0,156 - 2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}) - 29 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3}}{2(\pi + 29)} = 4,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Принимаем $r_1 = 4,75 \cdot 10^{-3}$ м.

33. Меньший радиус по (10.15)

$$\frac{\pi(D - 2h_{\text{п}}) - Zb_Z}{2(Z - \pi)} = \frac{\pi(0,156 - 2 \cdot 22 \cdot 10^{-3}) - 29 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3}}{2(29 - \pi)} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

34. Расстояние между центрами радиусов по (10.16)

$$h_1 = h_{\text{п}} - h_{\text{ш}} - r_1 - r_2 = 22 \cdot 10^{-3} - 4,75 \cdot 10^{-3} - 3,3 \cdot 10^{-3} = 13 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

35. Минимальное сечение зубцов якоря по табл. 10.16

$$S_Z = \frac{Z}{2p} \alpha_{\delta} b_Z b_{\delta} k_c =$$
$$= \frac{29}{4} \cdot 0,62 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot 232 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 = 61,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

36. Предварительное значение ЭДС

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} k_d = 220 \cdot 0,9 = 198 \text{ В},$$

где $k_d = 0,9$ по табл. 10.8.

37. Предварительное значение магнитного потока на полюс

$$\Phi_{\delta \text{ ном}} = \frac{60 E_{\text{ном}} a}{p N l_{\text{ном}}} = \frac{60 \cdot 198 \cdot 1}{2 \cdot 348 \cdot 1500} = 1,14 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}.$$

38. Для магнитопровода якоря принимаем сталь марки 2312. Индукция в сечении зубцов

$$B_Z = \Phi_{\delta \text{ ном}} / S_Z = 1,14 \cdot 10^{-2} / 61,4 \cdot 10^{-4} = 1,856 \text{ Тл}.$$

Расчет обмотки якоря

39. Длина лобовой части витка

$$l_{\text{л}} \approx (1,2 \div 1,35) \tau = (1,2 \div 1,35) \cdot 122 \cdot 10^{-3} = 165 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

40. Средняя длина витка обмотки якоря по (10.22)

$$l_{\text{а ср}} = 2(l_{\text{п}} + l_{\text{л}}) = 2(0,232 + 0,165) = 0,794 \text{ м.}$$

41. Полная длина обмотки якоря

$$L_{\text{ма}} = \frac{N}{2} l_{\text{а ср}} = \frac{348}{2} 0,794 = 138,1 \text{ м.}$$

42. Сопротивление обмотки якоря при $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$

$$R_{\text{а}} = \frac{L_{\text{ма}}}{57 \cdot 10^6 q_{\text{а}} (2a)^2} = \frac{138,1}{57 \cdot 10^6 \cdot 4,022 \cdot 10^{-6} \cdot 2^2} = 0,156 \text{ Ом.}$$

43. Сопротивление обмотки якоря при $\vartheta = 75^{\circ}\text{C}$ (см. табл. 5.1)

$$R_{\text{аи}} = 1,22 R_{\text{а}} = 1,22 \cdot 0,156 = 0,19 \text{ Ом.}$$

44. Масса меди обмотки якоря по (10.26)

$$m_{\text{ма}} = 8900 L_{\text{ма}} q_{\text{а}} = 8900 \cdot 138,1 \cdot 4,022 \cdot 10^{-6} = 4,94 \text{ кг.}$$

45. Расчет шагов обмотки:

а) шаг по коллектору и результирующий шаг

$$y_{\text{к}} = y = (K \pm 1)/p = (87 - 1)/2 = 43;$$

б) первый частичный шаг

$$y_1 = K/(2p) \pm \epsilon = 87/4 \pm 3/4 = 21;$$

в) второй частичный шаг

$$y_2 = y - y_1 = 43 - 21 = 22.$$

Определение размеров магнитной цепи

46. Предварительное значение внутреннего диаметра якоря и диаметра вала

$$D_0 = 27 \sqrt[3]{\frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}} = 27 \sqrt[3]{11/1500} = 52 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

где $P_{\text{ном}} = 11 \text{ кВт}$; $n_{\text{ном}} = 1500 \text{ об/мин.}$

По табл. 10.11 принимаем $D_0 = 55 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

47. Высота спинки якоря (см. рис. 10.12)

$$h_j = \frac{D - D_0}{2} - h_{\text{п}} = \frac{156 \cdot 10^{-3} - 55 \cdot 10^{-3}}{2} - 22 \cdot 10^{-3} = 28,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

48. Принимаем для сердечников главных полюсов сталь марки 3411 толщиной 0,5 мм, коэффициент рассеяния $\sigma_{\text{г}} = 1,15$, длину сердечника $l_{\text{г}} = l_{\delta} = 0,232 \text{ м,}$

коэффициент заполнения стальной по табл. 2.1 $k_c = 0,95$, ширину выступа полюсного наконечника $b_v \approx 0,2b_p = 8 \cdot 10^{-3}$ м.

49. Ширина сердечника главного полюса (см. рис. 10.18)

$$b_r = b_p - 2b_{r,v} = 76 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

50. Индукция в сердечнике по (табл. 10.17)

$$B_r = \frac{\sigma_r \Phi_{\text{диом}}}{k_c b_r l_r} = \frac{1,15 \cdot 1,14 \cdot 10^{-2}}{0,95 \cdot 60 \cdot 10^{-3} \cdot 232 \cdot 10^{-3}} = 0,99 \text{ Тл.}$$

51. Сечение станины

$$S_c = \frac{\sigma_r \Phi_{\text{диом}}}{2B_c} = \frac{1,15 \cdot 1,14 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 1,3} = 50,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где $B_c = 1,3$ Тл (см. § 10.6).

52. Длина станины по (10.52)

$$l_c = l_r + 0,4D = 0,232 + 0,4 \cdot 0,156 = 294 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

53. Высота станины (см. табл. 10.17)

$$h_c = S_c / l_c = 50,4 \cdot 10^{-4} / (294 \cdot 10^{-3}) = 17 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

54. Внешний диаметр станины

$$D_{\text{вн}} = 2h - (8 - 10) \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 160 \cdot 10^{-3} - (8 - 10) \cdot 10^{-3} = 310 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

55. Внутренний диаметр станины

$$d_c = D_{\text{вн}} - 2h_c = 310 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 276 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

56. Высота главного полюса (см. рис. 10.23)

$$h_r = \frac{d_c - D - 2\delta}{2} = \frac{276 \cdot 10^{-3} - 156 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{2} = 58,5 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

где $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м — воздушный зазор согласно рис. 10.17.

Расчетные сечения магнитной цепи

57. Сечение воздушного зазора (см. табл. 10.17)

$$S_\delta = b_p l_\delta = 76 \cdot 10^{-3} \cdot 232 \cdot 10^{-3} = 176,32 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

58. Длина стали якоря

$$l_{\text{ст}} - l_\delta k_{\text{ст}} = 232 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 = 0,220 \text{ м.}$$

59. Минимальное сечение зубцов якоря (см. табл. 10.16)

$$S_z = 61,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

60. Сечение спинки якоря (см. табл. 10.16)

$$S_j = l_{\text{ст}} h_j = 220 \cdot 10^{-3} \cdot 28,5 \cdot 10^{-3} = 62,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

61. Сечение сердечника главного полюса (см. табл. 16)

$$S_{\Gamma} = k_{\text{ст}} l_{\Gamma} b_{\Gamma} = 0,95 \cdot 232 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 132,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

62. Сечение станины (см. п. 51)

$$S_c = 50,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Средние длины магнитных линий

63. Воздушный зазор (см. рис. 10.17)

$$\delta = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

64. Коэффициент воздушного зазора, учитывающий наличие пазов на якоре, по (10.50)

$$k_{\delta a} = \frac{l_{Z1} + 10\delta}{l_{Z1} - b_{\text{ш}} + 10\delta} = \frac{16,9 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{16,9 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} = 1,1.$$

65. Расчетная длина воздушного зазора

$$L_{\delta} = k_{\delta a} \delta = 1,1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 1,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

66. Длина магнитной линии в зубцах якоря (см. табл. 10.16)

$$L_Z = h_{\text{п}} - 0,2r_1 = 22 \cdot 10^{-3} - 0,2 \cdot 4,75 \cdot 10^{-3} = 21 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

67. Длина магнитной линии в спинке якоря (см. табл. 10.16)

$$L_j = \frac{\pi(D_0 + h_j)}{4\rho} + \frac{h_j}{2} = \\ = \frac{\pi(55 \cdot 10^{-3} + 28,5 \cdot 10^{-3})}{4 \cdot 2} + \frac{28,5 \cdot 10^{-3}}{2} = 47 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

68. Длина магнитной линии в сердечнике главного полюса

$$L_{\Gamma} = h_{\Gamma} = 58,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

69. Воздушный зазор между главным полюсом и станиной

$$L_{\text{с.п}} = 2l_{\Gamma} \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} \approx 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

70. Длина магнитной линии в станине (табл. 10.16)

$$L_c = \frac{\pi(D_{\text{вн}} - h_c)}{4\rho} + \frac{h_c}{2} = \\ = \frac{\pi(310 \cdot 10^{-3} - 17 \cdot 10^{-3})}{4 \cdot 2} + \frac{17 \cdot 10^{-3}}{2} = 123,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Индукция в расчетных сечениях магнитной цепи

71. Индукция в воздушном зазоре (см. табл. 10.16)

$$B_{\delta \text{ном}} = \Phi_{\delta \text{ном}} / S_{\delta} = 1,14 \cdot 10^{-2} / 176,32 \cdot 10^{-4} = 0,646 \text{ Тл}.$$

72. Индукция в сечении зубцов якоря (табл. 10.16)

$$B_Z = \Phi_{\delta \text{ном}} / S_Z = 1,14 \cdot 10^{-2} / (61,4 \cdot 10^{-4}) = 1,85 \text{ Тл.}$$

73. Индукция в спинке якоря (табл. 10.16)

$$B_j = \Phi_{\delta \text{ном}} / 2S_j = 1,14 \cdot 10^{-2} / (2 \cdot 62,8 \cdot 10^{-4}) = 0,9 \text{ Тл.}$$

74. Индукция в сердечнике главного полюса (см. табл. 10.16)

$$B_{\Gamma} = \frac{\sigma_{\Gamma} \Phi_{\delta \text{ном}}}{S_{\Gamma}} = \frac{1,15 \cdot 1,14 \cdot 10^{-2}}{132,2 \cdot 10^{-4}} = 0,99 \text{ Тл.}$$

Для стали 3411 допустимое значение $B_{\Gamma} \leq 1,5 \text{ Тл.}$

75. Индукция в станине (см. табл. 10.16)

$$B_c = \frac{\sigma_{\Gamma} \Phi_{\delta \text{ном}}}{2S_c} = \frac{1,15 \cdot 1,14 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 50,4} = 1,3 \text{ Тл.}$$

76. Индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной $B_{\text{с.л}} = B_{\Gamma} = 0,9 \text{ Тл.}$

Магнитные напряжения

77. Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_{\delta} = 0,8 B_{\delta} L_{\delta} \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,646 \cdot 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 852,7 \text{ А.}$$

78. Коэффициент вытеснения потока

$$k_Z = \frac{t_{Z1} l_{\delta}}{b_Z l_{\text{ст}}} = \frac{16,9 \cdot 10^{-3} \cdot 232 \cdot 10^{-3}}{6,2 \cdot 10^{-3} \cdot 220,4 \cdot 10^{-3}} = 2,87.$$

79. Магнитное напряжение зубцов якоря

$$F_Z = H_Z L_Z = 16,4 \cdot 10^3 \cdot 21 \cdot 10^{-3} = 344,4 \text{ А.}$$

$H_Z = 16,4 \cdot 10^3 \text{ А/м}$ определяется по приложению 1 для стали марки 2312 при индукции в зубце согласно п. 72 $B_Z = 1,85 \text{ Тл.}$

80. Магнитное напряжение ярма якоря

$$F_j = H_j L_j = 1,9 \cdot 10^2 \cdot 47 \cdot 10^{-3} = 8,9 \text{ А.}$$

где $H_j = 1,9 \cdot 10^2 \text{ А/м}$ по приложению 1.

81. Магнитное напряжение сердечника главного полюса (сталь марки 3411)

$$F_{\Gamma} = H_{\Gamma} L_{\Gamma} = 1,7 \cdot 10^2 \cdot 58,5 \cdot 10^{-3} = 9,9 \text{ А.}$$

где $H_{\Gamma} = 1,7 \cdot 10^2 \text{ А/м}$ по приложению 1.

82. Магнитное напряжение воздушного зазора между главным полюсом и станиной

$$F_{\text{с.л}} = 0,8 B_{\Gamma} L_{\text{с.л}} \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,99 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 119 \text{ А.}$$

Таблица 10.20. Расчет характеристик намагничивания машины

Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	$0,5\Phi_{\delta\text{ном}}$	$0,75\Phi_{\delta\text{ном}}$	$0,9\Phi_{\delta\text{ном}}$	$1,0\Phi_{\delta\text{ном}}$	$1,1\Phi_{\delta\text{ном}}$	$1,15\Phi_{\delta\text{ном}}$
ЭДС	E	В	99	148,5	178,2	198	217,8	227,7
Магнитный поток	$\Phi_{\delta\text{ном}} = \frac{60aE}{\pi rN}$	Вб	$0,57 \cdot 10^{-2}$	$0,86 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$
Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{a \tau l_{\delta}}$	Тл	0,323	0,484	0,581	0,646	0,71	0,743
Магнитное напряжение в воздушного зазора	$F_{\delta} = 0,8 L_{\delta} B_{\delta} \cdot 10^{+6}$	А	426	639	767,4	852,7	938	980,6
Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_Z = k_Z B_{\delta}$	Тл	0,927	1,39	1,67	1,854	2,04	2,13
Напряженность магнитного поля в зубцах якоря для стали 2312	H_Z	А/м	205	940	5900	16 640	30 000	50 000
Магнитное напряжение зубцов	$F_Z = L_Z H_Z$	А	4,3	19,7	124	349	630	1050
Магнитная индукция в спинке якоря	$B_j = \Phi_{\delta} / 2S_j$	Тл	0,45	0,675	0,81	0,99	0,99	1,035
Напряженность магнитного поля в спинке якоря	H_j	А/м	73	128	145	190	235	260

Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	$0,5\Phi_{\delta_{ном}}$	$0,75\Phi_{\delta_{ном}}$	$0,9\Phi_{\delta_{ном}}$	$1,0\Phi_{\delta_{ном}}$	$1,1\Phi_{\delta_{ном}}$	$1,15\Phi_{\delta_{ном}}$
Магнитное напряжение ярма якоря	$F_j = L_j H_j$	А	3,4	6,0	6,8	8,9	11	12,2
Магнитный поток главного полюса	$\Phi_{\Gamma} = \sigma_{\Gamma} \Phi_{\delta}$	Вб	$0,65 \cdot 10^{-2}$	$0,97 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Магнитная индукция в сердечнике главного полюса	$B_{\Gamma} = \Phi_{\Gamma} / S_{\Gamma}$	Тл	0,495	0,748	0,89	0,99	1,089	1,14
Напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса для стали 3411	H_{Γ}	А/м	85	127,5	153	170	220	240
Магнитное напряжение сердечника главного полюса	$F_{\Gamma} = L_{\Gamma} H_{\Gamma}$	А	4,8	7,2	8,7	9,7	12,5	13,7
Магнитная индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной	$B_{с.п} = B_{\Gamma}$	Тл	0,495	0,74	0,89	0,99	1,089	1,14
Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и главным полюсом	$F_{с.п} = 0,8 B_{с.п} L_{с.п} \times 10^6$	А	60	89	107	119	131	137

Магнитная индукция в сталине	$B_c = \frac{\sigma_r \Phi \delta}{Z S_c}$	Тл	0,65	0,975	1,17	1,3	1,43	1,5
Напряженность магнитного поля в сталине (для массивных стайнн)	H_c	А/м	535	890	1227	1590	2300	2890
Магнитное напряжение стайны	$F_c = L_c H_c$	А	66	110	151	196	284	357
Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи	$F_\delta + F_z + F_j + F_{сд} + F_c = \sum F$	А	564	925	1041	1530	2006	2550
Сумма магнитных напряжений участков переходного слоя	$F_\delta + F_j + F_j$	А	434	665	898	1211	1579	2043

83. Магнитное напряжение станины (массивная сталь марки Ст3)

$$F_c = H_c L_c = 15,90 \cdot 10^2 \cdot 123,5 \cdot 10^{-3} = 196 \text{ А},$$

где $H_c = 15,90 \cdot 10^2 \text{ А/м}$ по приложению 1.

84. Суммарная МДС на полюс

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_Z + F_f + F_r + F_{сг} + F_c =$$

$$= 852,7 + 344,4 + 8,9 + 9,7 + 119 + 196 = 1530 \text{ А}.$$

Расчет характеристик намагничивания машин приведен в табл. 10.20.

85. МДС переходного слоя

$$F_{\delta Zf} = F_{\delta} + F_Z + F_f = 852,7 + 344,4 + 8,9 = 1206 \text{ А}.$$

Расчет параллельной обмотки возбуждения

86. Размагничивающее действие реакции якоря определяют по переходной характеристике (рис. 10.33) согласно $10,5 F_{qd} = 220 \text{ А}$.

87. Необходимая МДС параллельной обмотки

$$F_v = F_{\Sigma} + F_{qd} = 1530 + 220 = 1750 \text{ А},$$

88. Принимаем предварительно ширину катушки параллельной обмотки $b_{к.в} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, тогда средняя длина витка обмотки по (10.57)

$$l_{ср.в} = 2(l_r + b_r) + \pi(b_{к.в} + 2\Delta_{из}) =$$

$$= 2(255 \cdot 10^{-3} + 60 \cdot 10^{-3}) + \pi(25 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}) = 711,7 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где $\Delta_{из} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – односторонний зазор между катушкой и полюсом.

89. Сечение меди параллельной обмотки по (10.58)

$$q_v = \frac{k_{з.в} m_2 p F_v l_{в.ср} a}{5,7 \cdot 10^6 U_v} =$$

$$= \frac{1,1 \cdot 1,22 \cdot 4 \cdot 1750 \cdot 711,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{57 \cdot 106 \cdot 220} = 0,533 \text{ мм}^2$$

где a – число параллельных ветвей обмотки параллельного возбуждения, принимаем $a = 1$; $k_z = 1,1 \div 1,2$ – коэффициент запаса.

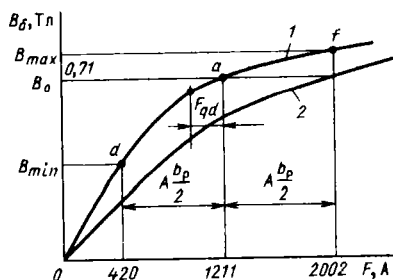


Рис. 10.33. Переходная характеристика (1) и характеристика холостого хода (2) машины

Принимаем по табл.10.18 круглый провод ПЭТВ, по табл. ПЗ.1 диаметр неизолированного провода $d_r = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр изолированного провода $d_{из} = 0,865 \cdot 10^{-3}$ м, сечение провода $S_{из} = 0,503$ мм².

90. Принимаем номинальную плотность тока (для машин со степенью защиты IP22) по п. 10.7

$$J_B = 5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

91. Число витков на полюс по (10.64)

$$w_B = \frac{F_B}{J_B q_B} = \frac{1750}{5 \cdot 10^6 \cdot 0,503 \cdot 10^{-6}} = 696.$$

92. Определяем номинальный ток возбуждения:

$$I_{B,ном} = F_B / w_B = 1750 / 696 = 2,5 \text{ А.}$$

93. Плотность тока в обмотке

$$J_{B,ном} = 5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

94. Полная длина обмотки

$$L_B = 2p l_{B,ср} w_B = 4 \cdot 711,7 \cdot 10^{-3} \cdot 696 = 1981 \text{ м.}$$

95. Сопротивление обмотки возбуждения при температуре $t = 20^\circ \text{C}$

$$R_B = \frac{L_B}{57 \cdot 10^6 q_B} = \frac{1981}{57 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 69,1 \text{ Ом.}$$

96. Сопротивление обмотки возбуждения при $\vartheta = 75^\circ \text{C}$

$$R_{B75^\circ} = 1,22 R_B = 1,22 \cdot 69,1 = 84,3 \text{ Ом.}$$

97. Масса меди обмотки возбужденная

$$m_{м.в} = 8,9 L_B q_B \cdot 10^{-3} = 8,9 \cdot 1981 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 = 8,87 \text{ кг.}$$

Конструкции изоляции и крепления обмоток главных полюсов приведены в табл. 10.2 – 10.3.

Коллектор и щетки

98. Ширина нейтральной зоны по (10.76)

$$b_{н.з} = \tau - b_p = 122 \cdot 10^{-3} - 76 \cdot 10^{-3} = 46 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

99. Принимаем ширину щетки равной $b_{щ} = (2 \div 4) \tau_K$; по табл. П4.1 выбираем стандартные размеры щетки: $b_{щ} l_{щ} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

100. Поверхность соприкосновения щетки с коллектором

$$S_{щ} = b_{щ} l_{щ} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

101. При допустимой плотности тока $J_{щ} = 11 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$ число щеток на болт

$$N_{\text{ш}} = \frac{I_{\text{ном}}}{\rho S_{\text{ш}} J_{\text{ш}}} = \frac{59,5}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 11 \cdot 10^4} = 108.$$

Принимаем $N_{\text{ш}} = 1$.

102. Поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором

$$\Sigma S_{\text{ш}} = 2\rho N_{\text{ш}} S_{\text{ш}} = 4 \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} = 10 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

103. Плотность тока под щетками

$$J_{\text{ш}} = 2I_{\text{ном}}/\Sigma S_{\text{ш}} = 2 \cdot 59,5/10 \cdot 10^{-4} = 11,9 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2.$$

104. Активная длина коллектора по (10.80)

$$l_{\text{к}} = N_{\text{ш}} (l_{\text{ш}} + 8 \cdot 10^{-3}) + 10 \cdot 10^{-3} = \\ = 1(25 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-3}) + 10 \cdot 10^{-3} = 43 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Коммутационные параметры

105. Ширина зоны коммутации по (10.75)

$$b_{\text{з.к}} = \left(\frac{b_{\text{ш}}}{r_{\text{к}}} + u_{\text{п}} - \frac{a}{\rho} + \epsilon_{\text{к}} \right) r_{\text{к}} \frac{D}{D_{\text{к}}} = \\ = \left(\frac{10 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^{-3}} + 3 - \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \right) \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \frac{156 \cdot 10^{-6}}{125 \cdot 10^{-3}} = 30,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

106. Отношение $b_{\text{з.к}}/(\tau - b_{\text{р}}) = 30,7/46 = 0,668$, что удовлетворяет условию $b_{\text{з.к}}/(\tau - b_{\text{р}}) = 0,55 \div 0,7$.

107. Коэффициент магнитной проводимости паза (10.69)

$$\lambda = 0,6 \frac{h_{\text{п}}}{2r_2} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} + \frac{l_{\text{п}}}{l_{\text{а}}} + \frac{2,5 \cdot 10^5}{A l \omega_{\text{с}} v_{\text{а}}} \frac{a}{\rho} = \\ = 0,6 \frac{22 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,3 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} + \frac{165 \cdot 10^{-3}}{232 \cdot 10^{-3}} + \\ + \frac{2,5 \cdot 10^5}{20379 \cdot 232 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 12,2} \frac{1}{2} = 4,05,$$

где $v_{\text{а}} = \pi D n / 60 = \pi \cdot 156 \cdot 10^{-3} \cdot 1500 / 60 = 12,2 \text{ м/с}$ — скорость якоря.

108. Реактивная ЭДС (10.68)

$$E_{\text{р}} = 2\lambda \omega_{\text{с}} l_{\text{д}} A v_{\text{а}} \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 4,05 \cdot 2 \cdot 232 \cdot 10^{-3} \cdot 20379 \cdot 12,2 \cdot 10^{-6} = 0,93 \text{ В}.$$

109. Воздушный зазор под добавочным полюсом принимаем $\delta_{\text{д}} = (1,5 \div 2) \delta$, при $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ принимаем $\delta_{\text{д}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

110. Расчетная длина воздушного зазора под добавочным полюсом $L_{\delta_{\text{д}}} = k_{\delta_{\text{д}}} \delta_{\text{д}} = 1,07 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, где

$$k_{\delta_d} = \frac{t_{Z1} + 10\delta_d}{t_{Z1} - b_{\text{ш}} + 10\delta_d} = \frac{16,9 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{16,9 \cdot 10^{-3} - 3^{-3} + 10 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 1,07.$$

111. Средняя индукция в воздушном зазоре под добавочным полюсом

$$B_{\delta_d} = \frac{E'_p}{2w_c l_{\delta_d} \nu_a} = \frac{1,02}{2 \cdot 2 \cdot 232 \cdot 10^{-3} \cdot 12,2} \approx 0,1 \text{ Тл},$$

где $E'_p \approx 1,1 E_p \approx 1,1 \cdot 0,83 = 1,02$ В принимаем для обеспечения несколько ускоренной коммутации.

112. Расчетная ширина наконечника добавочного полюса согласно (10.82) и на основании предварительных расчетов

$$b'_d < (0,55 \div 0,75) b_{з.к} < (0,55 \div 0,75) \cdot 30,7 \cdot 10^{-3} = 17 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b'_d = b_{д.н} + 2\delta_d = 11 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 17 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

113. Действительную ширину наконечника добавочного полюса принимаем в пределах $b_{д.н} \approx (0,5 \div 0,65) b'_d$:

$$b_{д.н} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

114. Магнитный поток добавочного полюса в воздушном зазоре

$$\Phi_{\delta_d} = B_{\delta_d} l_{д.н} b'_d = 0,1 \cdot 232 \cdot 10^{-3} \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 0,394 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

115. Принимаем коэффициент рассеяния добавочного полюса $\sigma_d = 2,5$ (см. § 10.9), магнитный поток в сердечнике добавочного полюса

$$\Phi_d = \sigma_d \Phi_{\delta_d} = 2,5 \cdot 0,394 \cdot 10^{-3} = 0,985 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

116. Сечение сердечника добавочного полюса

$$S_d = l_{д.н} b_{д.н} k_c = 232 \cdot 10^{-3} \cdot 11 \cdot 0,95 = 24,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

117. Расчетная индукция в сердечнике добавочного полюса

$$B_{с.д} = \Phi_d / S_d = 0,985 \cdot 10^{-3} / (24,2 \cdot 10^{-4}) = 0,4 \text{ Тл}.$$

118. Высота добавочного полюса

$$L_d = (D_a - 2\delta_d) / 2 = 57 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Результаты расчета магнитной цепи добавочных полюсов сведены в табл. 10.21.

Расчет обмотки добавочных полюсов

119. МДС обмотки добавочного полюса (табл. 10.21)

$$F_d = 1565 \text{ А}.$$

120. Число витков обмотки добавочного полюса на один полюс по (10.87)

$$w_d = F_d / I = 1565 / 57,42 = 27,25,$$

принимая $w_d = 28$ витков.

Таблица 10.21. Расчет МДС обмотки добавочных полюсов

Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
Магнитный поток в воздушном зазоре	$\Phi_{\delta\text{д}}$	Вб	$0,646 \cdot 10^{-3}$
Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_{\delta\text{д}} = \frac{\Phi_{\delta\text{д}}}{b'_{\text{дн}} l_{\delta}}$	Тл	0,10
Магнитное напряжение воздушного зазора	$F_{\delta\text{д}} = 0,8 L_{\delta\text{д}} B_{\delta\text{д}} \cdot 10^6$	А	240
Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_Z = k_Z B_{\delta\text{д}}$	Тл	0,287
Напряженность магнитного поля в зубцах якоря	H_Z	А/м	50
Магнитное напряжение зубцов якоря	$F_Z = H_Z L_Z$	А	1,05
Магнитная индукция в ярме: на участке согласного направления главного потока и потока добавочных полюсов	$B_{j1} = \frac{\Phi_{\delta} + \Phi_{\delta\text{д}}}{2S_j}$	Тл	0,937
на участке встречного направления главного потока добавочных полюсов	$B_{j2} = \frac{\Phi_{\delta} - \Phi_{\delta\text{д}}}{2S_j}$	Тл	0,875
Напряженность магнитного поля: на участке с индукцией B_{j1}	H_{j1}	А/м	210
на участке с индукцией B_{j2}	H_{j2}	А/м	177
средняя напряженность магнитного поля в ярме	$H_{j\text{ср}} = \frac{H_{j1} - H_{j2}}{2}$	А/м	33
Магнитное напряжение якоря	$F_j = H_{j\text{ср}} L_j$	А	1,5
Магнитный поток добавочного полюса	$\Phi_{\text{д}} = \sigma_{\text{д}} \Phi_{\delta\text{д}}$	Вб	$0,985 \cdot 10^{-3}$
Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса	$B_{\text{с.д}} = \Phi_{\text{д}} / S_{\text{д}}$	Тл	0,407
Напряженность магнитного поля в сердечнике добавочного полюса	$H_{\text{с.д}}$	А/м	336
Магнитное напряжение сердечника добавочного полюса	$F_{\text{д.п}} = L_{\text{д}} H_{\text{с.д}}$	А	19,65

Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и добавочным полюсом при $\delta_{с.д.л} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м	$F_{\delta_{с.д.л}} = 0,8 B_{с.д} \delta_{с.д.л}$	А	65
Магнитная индукция в станине:			
на участке согласного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов	$B_{с1} = \frac{\Phi_r + \Phi_d}{2S_c}$	Тл	1,41
на участке встречного направления магнитных полюсов главного и добавочного полюсов	$B_{с2} = \frac{\Phi_r - \Phi_d}{2S_c}$	Тл	1,39
Напряженность магнитного поля в станине:			
на участке с индукцией $B_{с1}$	$H_{с1}$	А/м	2351
на участке с индукцией $B_{с2}$	$H_{с2}$	А/м	2280
Средняя напряженность магнитного поля в станине	$H_{с.ср} = \frac{H_{с1} - H_{с2}}{2}$	А/м	37
Магнитное напряжение участка станины	$F_c = H_{с.ср} L_c$	А	4,6
Сумма магнитных напряжений всех участков	$F_{д\Sigma} = F_{\delta_d} + F_z + F_j + F_{с.д} + F_{\delta_{с.д.л}} + F_c$	А	322
МДС обмотки добавочного полюса	$F_d = F_{д\Sigma} + A \frac{\tau}{2}$	А	1565

121. Предварительное сечение проводников по (10.88)

$$q_d = I / (a_d J_d) = 57,42 / (1,5 \cdot 10^6) = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

При токе $I_d \leq 1000$ А целесообразно принимать $a_d = 1$. Для многослойных обмоток выбираем согласно рекомендациям в § 10.9 плотность тока $J_d = 5 \times 10^6$ А/м².

122. Принимаем проводник обмотки добавочных полюсов: круглый провод марки ПСД (табл. 10.18) диаметром $d_r = 3,75 \cdot 10^{-3}$ м (см. табл. ПЗ.1), диаметр изолированного провода $d_{из} = 4,15 \cdot 10^{-3}$ м, сечение провода $q_d \approx 11,04 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Выполняем эскиз катушки добавочного полюса и определяем предварительное значение ширины катушки $b_{к.т.д.}$

123. Принимаем сердечник добавочного полюса короче якоря на $1 \cdot 10^{-3}$ м с каждой стороны для создания опоры для катушки. Длина сердечника $l_{\text{д}} = l_{\text{я}} - 2 \cdot 10^{-3} = 232 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3} = 230 \cdot 10^{-3}$ м.

124. Средняя длина витка обмотки добавочного полюса по (10.89)

$$l_{\text{д.ср}} = 2(230 \cdot 10^{-3} + 11 \cdot 10^{-3}) + \pi(11 + 2) \cdot 10^{-3} = 529 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

125. Полная длина проводников обмотки

$$L_{\text{д}} = 2p l_{\text{д.ср}} w_{\text{д}} = 4 \cdot 529 \cdot 10^{-3} \cdot 28 = 58,6 \text{ м.}$$

126. Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре $\vartheta = 20^\circ \text{C}$ по (10.90)

$$R_{\text{д}} = \frac{l_{\text{д}}}{57 \cdot 10^6 \alpha_{\text{д}}^2 q_{\text{д}}} = \frac{58,6}{57 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 11,04 \cdot 10^{-6}} = 0,093 \text{ Ом.}$$

127. Сопротивление обмотки добавочных полюсов при $\vartheta = 75^\circ \text{C}$

$$R_{\text{д}75^\circ} = 1,22 R_{\text{д}} = 1,22 \cdot 0,093 = 0,113 \text{ Ом.}$$

128. Масса меди обмотки добавочных полюсов

$$m_{\text{д}} = 8,9 \cdot 10^3 l_{\text{д.ср}} q_{\text{д}} = 8,9 \cdot 10^3 \cdot 58,6 \cdot 11,04 \cdot 10^{-6} = 5,75 \text{ кг.}$$

Потери и КПД по (10.10)

129. Электрические потери в обмотке якоря при температуре 75°C

$$P_{\text{за}} = I^2 R_{\text{я}75^\circ} = (57,42)^2 \cdot 0,19 = 626 \text{ Вт.}$$

130. Электрические потери в обмотке добавочных полюсов

$$P_{\text{эд}} = I^2 R_{\text{д}75^\circ} = (57,42)^2 \cdot 0,113 = 372 \text{ Вт.}$$

131. Электрические потери в параллельной обмотке возбуждения

$$P_{\text{э.в}} = U_{\text{в}} I_{\text{в}} = 220 \cdot 2,5 = 550 \text{ Вт.}$$

132. Электрические потери в переходном контакте щеток

$$P_{\text{э.щ}} = 2 \Delta U_{\text{щ}} I = 2,5 \cdot 57,42 = 143,55 \text{ Вт,}$$

где $2 \Delta U_{\text{щ}} = 2,5$ В для марки щеток ЭГ-14 по табл. П4.2.

133. Потери на трение щеток о коллектор

$$P_{\text{т.щ}} = \sum S_{\text{щ}} p_{\text{щ}} f v_{\text{к}} = 10 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot 0,2 \cdot 9,8 = 58,8 \text{ Вт,}$$

где p — давление на щетку; для щетки марки ЭГ-14 $p_{\text{щ}} = 3 \cdot 10^4$ Па; $f = 0,2$ — коэффициент трения щетки.

134. Потери в подшипниках и на вентиляцию определяются по рис. 10.28:

$$(P_{\text{т.п}} + P_{\text{вент}}) = 110 \text{ Вт.}$$

135. Масса стали ярма якоря по (10.103)

$$m_j = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\pi [(D - 2h_n)^2 - D_0^2]}{4} l_{ст} k_{ст} =$$

$$= 7,8 \cdot 10^3 \frac{\pi [(156 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 22 \cdot 10^{-3})^2 - (55 \cdot 10^{-3})^2]}{4} 232 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 =$$

$$= 12,85 \text{ кг.}$$

136. Условная масса стали зубцов якоря

$$m_Z = 7,8 \cdot 10^3 Z b_Z \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2} \right) l_{\delta} k_{ст} =$$

$$= 7,8 \cdot 10^3 \cdot 29 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3} \left(13 \cdot 10^{-3} + \frac{4,75 \cdot 10^{-3} + 3,3 \cdot 10^{-3}}{2} \right) 232 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 =$$

$$= 5,2 \text{ кг.}$$

137. Магнитные потери в ярме якоря

$$P_f = m_j p_f = 12,85 \cdot 3,26 = 42 \text{ Вт,}$$

$$\text{где } p_f = 2,3 p_{1,0/50} (f/50)^{\beta} B_f^2 = 2,3 \cdot 1,75 \cdot 0,89^2 = 3,26 \text{ Вт/кг.}$$

При $f = 50 \text{ Гц}$ $f/50 = 1$.

138. Магнитные потери в зубцах якоря

$$P_Z = m_Z p_Z = 5,2 \cdot 13,8 = 71,7 \text{ Вт,}$$

где

$$p_Z = 2,3 p_{1,0/50} (f/50)^{\beta} B_Z^2 = 2,3 \cdot 1,75 \cdot 1,854^2 = 13,8 \text{ Вт/кг.}$$

139. Добавочные потери

$$P_{доб} = 0,01 U I_{ном} = 0,01 \cdot 220 \cdot 59,7 = 131 \text{ Вт.}$$

140. Сумма потерь

$$\Sigma P = P_{\Sigma a} + P_{\Sigma d} + P_{\Sigma v} + P_{\Sigma ш} + P_{т.ш} +$$

$$+ (P_{т.п} + P_{вент}) + P_f + P_Z + P_{доб} =$$

$$= 626 + 372 + 550 + 143,5 + 58,8 + 110 + 42 + 71,7 + 131 = 2105 \text{ Вт.}$$

141. Потребляемая мощность

$$P_1 = P_{ном} + \Sigma P = 11\,000 + 2105 = 13\,105 \text{ Вт;}$$

$$I_{1ном} = P_1 / U_{ном} = 13\,105 / 220 = 59,56 \text{ А;}$$

$$I_{ном} = 59,56 - 2,5 = 57,06 \text{ А.}$$

142. Коэффициент полезного действия

$$\eta = P_{ном} / (P_{ном} + \Sigma P) = 11\,000 / 13\,105 = 0,839.$$

Рабочие характеристики

При построении рабочих характеристик двигателя и уточнении его номинальных данных принимаем, что потери холостого хода двигателя практически не меняются при изменении нагрузки и составляют

$$P_0 = P_f + P_Z + (P_{т.п} + P_{вент}) + P_{т.щ} = 42 + 71,7 + 110 + 58,8 = 282,5 \text{ Вт.}$$

При расчете характеристик принимаем напряжение питания $U = 220 \text{ В}$, ток возбуждения соответствует номинальному значению тока возбуждения $I_B = 2,63 \text{ А}$.

143. МДС реакции якоря. Расчеты по переходной характеристике значений F_{qd} при нескольких значениях тока якоря и графическое построение характеристики $F_{qd} = f(I)$ показывают, что эту характеристику можно аппроксимировать функцией типа $F_{qd} = (I - 15)/(I_{ном} - 15)$. Поэтому в дальнейшем будем использовать эту функцию для учета размагничивающего действия реакции якоря при построении рабочих характеристик двигателя.

144. При номинальном токе якоря $I_{аном} = 57 \text{ А}$ ЭДС обмотки якоря

$$E_{ном} = U - I_a(R_a + R_d) - 2\Delta U_{щ} = 220 - 57(0,19 + 0,113) - 2,5 = 200,23 \text{ В.}$$

145. Номинальный магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi_{ном} = \frac{60E_{ном}^a}{pN \cdot 1500} = \frac{60 \cdot 200,23}{2 \cdot 348 \cdot 1500} = 1,50 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

146. По характеристике холостого хода (см. рис. 10.33) находим

$$B_\delta = 0,651 \text{ Тл; } F_\Sigma = 1560 \text{ А.}$$

147. МДС обмотки возбуждения

$$F_B = F_\Sigma + F_{qd} = 1560 + 220 = 1780 \text{ А.}$$

148. Номинальный ток возбуждения

$$I_{вном} = F_B / w_B = 1780 / 696 = 2,56 \text{ А.}$$

149. Номинальный ток двигателя

$$I_{1ном} = I_{ном} + I_{вном} = 57,06 + 2,56 = 59,6 \text{ А.}$$

Таблица 10.22. Рабочие характеристики двигателя

$I_B, \text{ А}$	$I_a, \text{ А}$	$E, \text{ В}$	$F_\Sigma, \text{ А}$	$\Phi_\delta, 10^2 \text{ Вб}$
2,56	10	214,4	1780	1,19
2,56	20	211,4	1753	1,185
2,56	30	208,4	1700	1,18
2,56	40	205,4	1648	1,175
2,56	56,8	200,3	1558	1,15
2,56	70	196,3	1490	1,135

150. Полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = EI_{\text{ном}} - P_0 - P_{\text{доб}} (I_{\text{ном}}/I_{1\text{ном}})^2 =$$

$$= 200,23 \cdot 57,06 - 282,5 - 131 (59,7/59,6)^2 = 11000 \text{ Вт.}$$

151. Коэффициент полезного действия

$$\eta = P_2/P_1 = 11\,000/13\,103 = 0,84;$$

$$P_1 = UI_{1\text{ном}} = 220 \cdot 59,6 = 13\,110.$$

152. Вращающий момент

$$M = 9,57 \cdot 10^3 \frac{P_2}{n} = 9,57 \cdot 10^3 \frac{11\,000}{1500} = 70,18 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Результаты расчетов, выполненных по п. 148–152 для ряда значений тока якоря, сведены в табл. 10.22. Рабочие характеристики двигателя приведены на рис. 10.34. В соответствии с заданием рассчитан двигатель и разработаны основные элементы его конструкции. Основные данные двигателя соответствуют требованиям задания и имеют следующие номинальные значения:

$$P_{\text{ном}} = 11 \text{ кВт}; n_{\text{ном}} = 1500 \text{ об/мин}; \eta = 84\%; I_{\text{ном}} = 57,06 \text{ А};$$

$$I_{1\text{ном}} = 59,6 \text{ А}; I_{\text{в.ном}} = 2,56 \text{ А};$$

$$P_{1\text{ном}} = 13\,110 \text{ Вт.}$$

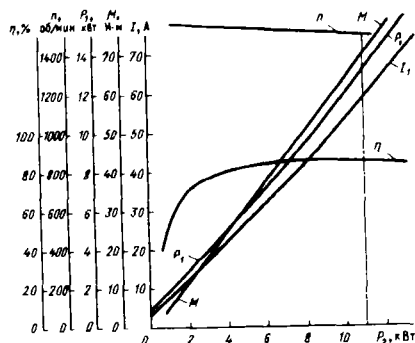


Рис. 10.34. Рабочие характеристики электродвигателя

n , об/мин	M , Н·м	P_2 , Вт	I_1 , А	P_1 , Вт	η , %
1553	11,79	1858	12,56	2763	67,2
1538	24,9	3945	22,56	4963	79,5
1522	37,65	5934	32,56	7163	82,8
1506	50,9	7955	42,56	9363	85
1501	70,3	10 965	59,36	13 060	84
1490	85,5	13 263	72,56	15 963	83,1

153. Расчетные сопротивления обмоток

$$R_{aT} = R_{aH} k_T = 0,19 \cdot 1,15 = 0,2185 \text{ Ом},$$

где k_T — поправочный коэффициент, с помощью которого приводятся температуры обмоток к предельным допустимым температурам; при классе нагревостойкости В $k_T = 1,15$.

$$R_{dT} = R_{dH} 1,15 = 0,113 \cdot 1,15 = 0,13 \text{ Ом};$$

$$R_{вТ} = R_{вH} 1,15 = 84,3 \cdot 1,15 = 97 \text{ Ом}.$$

154. Потери в обмотках

$$P_{aT} = I_{\text{ном}}^2 R_{aT} = 57^2 \cdot 0,2185 = 710 \text{ Вт};$$

$$P_{dT} = I_{\text{ном}}^2 R_{dT} = 57^2 \cdot 0,130 = 422 \text{ Вт};$$

$$P_{вТ} = I_{\text{ном}}^2 R_{вТ} = 2,56^2 \cdot 97 = 636 \text{ Вт}.$$

155. Коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности якоря (по рис. 10.31)

$$\alpha_a = 85 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}.$$

156. Превышение температуры охлаждаемой поверхности якоря по (10.133)

$$\Delta\vartheta_a = \frac{P_{aT} (2l_\delta / l_{a\text{ср}}) P_{ст}}{\pi D l_a \alpha_a} =$$

$$= \frac{710 (2 \cdot 0,232 / 0,794) + 113,2}{\pi \cdot 156 \cdot 10^{-3} \cdot 232 \cdot 10^{-2} \cdot 85} = 5,3 ^\circ\text{C}.$$

157. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки якоря по (10.135)

$$\Delta\vartheta_{\text{изл}} = \frac{P_{aT} (2l_\delta / l_{a\text{ср}})}{Z \Pi_\Pi l_\delta} \left(\frac{r_1 + r_2}{8\lambda_{\text{экр}}} + \frac{b_{\text{щ}}}{\lambda_{\text{экр}}} \right) =$$

$$= \frac{710 (2 \cdot 232 / 794)}{29 \cdot 51,4 \cdot 10^{-3} \cdot 232 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{4,75 + 3,3}{8 \cdot 1,4} + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{0,16} \right) = 5,1 ^\circ\text{C},$$

где

$$\Pi_\Pi = \pi(r_1 + r_2) + 2h_1 = \pi(4,75 + 3,3) \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 13 \cdot 10^{-3} = 51,4 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\lambda_{\text{экр}1} = 1,4 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$\lambda_{\text{экр}2} = 0,16 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

158. Превышение температуры охлаждаемой поверхности лобовых частей обмотки якоря по (10.134)

$$\Delta\vartheta_{\text{пов.л}} = \frac{P_{\text{ат}}(1 - 2l_{\delta}/l_{\text{аср}})}{\pi D l_{\text{в}} \alpha_{\text{л}}} =$$

$$= \frac{710 [1 - 2 \cdot 232 \cdot 10^{-3} / (794 \cdot 10^{-3})]}{\pi 156 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 46 \cdot 10^{-3} \cdot 85} \approx 77^{\circ}\text{C},$$

где $\alpha_{\text{л}} = 85 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ — коэффициент теплоотдачи с лобовых поверхностей обмотки якоря (см. рис. 10.31); $l_{\text{в}} = 0,4\tau = 0,4 \cdot 122 \cdot 10^{-3} = 46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ — вылет лобовых частей обмотки якоря.

159. Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки якоря по (10.136)

$$\Delta\vartheta_{\text{изл}} = \frac{P_{\text{ат}}(1 - 2l_{\delta}/l_{\text{аср}})}{2L\Pi_{\text{л}}} \left(\frac{h_{\text{л}}}{8\lambda_{\text{эжв}}} \right) =$$

$$= \frac{710 [1 - 2 \cdot 232 \cdot 10^{-3} / (794 \cdot 10^{-3})]}{2 \cdot 29 \cdot 23,6 \cdot 10^{-3}} \frac{22 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 1,4} = 0,42^{\circ}\text{C},$$

где

$$\Pi_{\text{л}} = (1 + \pi/2)(r_1 + r_2) + h_1(1 + \pi/2)(4,75 + 3,3) \cdot 10^{-3} + 13 \cdot 10^{-3} = 23,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

160. Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающего воздуха по (10.138)

$$\Delta\vartheta_{\text{аср}} = (\Delta\vartheta_{\text{а}} + \Delta\vartheta_{\text{изл}}) - \frac{2l_{\delta}}{l_{\text{аср}}} + (\Delta\vartheta_{\text{пов.л}} + \Delta\vartheta_{\text{изл}}) \left(1 - \frac{2l_{\delta}}{l_{\text{аср}}} \right) =$$

$$= (5,3 + 5,1) \frac{2 \cdot 232 \cdot 10^{-3}}{794 \cdot 10^{-3}} + (77 + 0,42) \left(1 - \frac{2 \cdot 232 \cdot 10^{-3}}{794 \cdot 10^{-3}} \right) = 39^{\circ}\text{C}.$$

161. Сумма потерь, отводимых воздухом, охлаждающим внутренний объем двигателя, согласно (10.120)

$$\Sigma P' = \Sigma P - P_{\text{вн}} = \Sigma P - 0,1(P_{\text{в.т}} + P_{\text{д.т}}) = 2103 - 0,1(636 + 422) = 1997 \text{ Вт}.$$

162. Условная поверхность охлаждения двигателя по (10.137)

$$S_{\text{охл}} = \pi D_{\text{ви}}(l_{\delta} + 2l_{\text{возл}}) =$$

$$= \pi 310 \cdot 10^{-3} (232 \cdot 10^{-3} + 92 \cdot 10^{-3}) = 0,316 \text{ м}^2,$$

163. Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_{\text{воз}} = \Sigma P' / (S_{\text{охл}} \alpha_{\text{н}}) = 1997 / (0,316 \cdot 650) = 9,7^{\circ}\text{C},$$

где $\alpha_{\text{н}} = 650 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ по рис. 10.32.

164. Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta'_{\text{аср}} = \Delta\vartheta_{\text{аср}} + \Delta\vartheta_{\text{воз}} = 39 + 9,7 = 48,7^{\circ}\text{C}.$$

Рис. 10.35. К определению наружной поверхности охлаждения обмоток главных и добавочных полюсов

165. Превышение температуры наружной поверхности катушки возбуждения над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta \vartheta_{п.в} = \frac{\Delta P'_{вт}}{2p S_{в} \alpha_{в}} =$$

$$= \frac{0,9 \cdot 636}{4 \cdot 53,91 \cdot 10^{-3} \cdot 50} = 53,1^{\circ}\text{C},$$

где $P'_{в.т}$ определяется согласно (9.120); $S_{в}$ — внешняя поверхность катушки обмотки возбуждения; $S_{в} = l_{в.ср} \Pi = 830 \cdot 10^{-3} \cdot 65 \cdot 10^{-3} = 53,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ (рис. 10.35).

166. Перепад температуры в изоляции катушки

$$\Delta \vartheta_{из.в} = \frac{k P'_{в}}{2p S_{в}} \left(\frac{b_{к.ср}}{8 \lambda_{эkv}} + \frac{b_{из}}{\lambda_{эkv}} \right) =$$

$$= \frac{0,9 \cdot 671}{4 \cdot 53,91 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{22 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 1,4} + \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{0,16} \right) = 9^{\circ}\text{C}.$$

167. Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды

$$\Delta \vartheta'_{ср.в} = \Delta \vartheta_{п.в} + \Delta \vartheta_{из.в} + \Delta \vartheta_{воз} = 53,1 + 9 + 9,7 = 71,8^{\circ}\text{C}.$$

168. Превышение температуры наружной поверхности добавочного полюса над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta \vartheta_{п.д} = \frac{k P'_{дт}}{2p S_{д} \alpha_{д}} = \frac{0,9 \cdot 422}{4 \cdot 28 \cdot 10^{-3} \cdot 48} = 70^{\circ}\text{C},$$

где

$$S_{д} = l_{д.ср} \Pi_{д} = 506 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 280 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$\alpha_{д} = 48 \text{ Вт/м}^2 \text{ (см. рис. 10.31)}.$$

169. Перепад температуры в изоляции катушки добавочного полюса

$$\Delta \vartheta_{из.д} = \frac{P'_{д.п}}{2p S_{д}} \frac{b_{к.тд}}{8 \lambda_{эkv}} = \frac{0,9 \cdot 422}{4 \cdot 28 \cdot 10^{-3}} \frac{14 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 1,4} = 4,2^{\circ}\text{C}.$$

Катушки добавочных полюсов не имеют наружной изоляции.

170. Среднее превышение температуры обмотки добавочных полюсов над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta_{\text{д.ср}} = \Delta\vartheta_{\text{п.д}} + \Delta\vartheta_{\text{из.д}} + \Delta\vartheta_{\text{воз}} = 70 + 4,2 + 9,7 = 83,9^\circ\text{C}.$$

171. Превышение температуры наружной поверхности коллектора над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_{\text{к}} = \frac{P_{\text{эщ}} + P_{\text{тщ}}}{S_{\text{к}} \alpha_{\text{к}}} = \frac{141,75 + 58,8}{\pi \cdot 125 \cdot 10^{-3} \cdot 43 \cdot 10^{-3} \cdot 140} = 84,8^\circ\text{C}$$

где $S_{\text{к}} = \pi D_{\text{к}} l_{\text{к}}$ — поверхность охлаждения коллектора; $\alpha_{\text{к}}$ — коэффициент теплоотдачи поверхности коллектора (см. рис. 10.32).

Вентиляционный расчет

Разрабатываемый двигатель имеет аксиальную вентиляцию, обеспечиваемую встроенным вентилятором центробежного типа.

172. Необходимое количество охлаждающего воздуха по (8.154)

$$Q_{\text{воз}} = \Sigma P' / (1100 \Delta\vartheta'_{\text{воз}}) = 1893 / (1100 \cdot 18,8) = 0,096 \text{ м}^3/\text{с},$$

где

$$\Sigma P' = (P_{1\text{ном}} - P_{\text{ном}}) 0,9; \quad \Delta\vartheta'_{\text{воз}} = 2 \Delta\vartheta_{\text{воз}} = 2 \cdot 9,4 = 18,8^\circ\text{C}.$$

173. Принимаем наружный диаметр центробежного вентилятора равным приблизительно $0,9 d_{\text{с}}$ (где $d_{\text{с}}$ — внутренний диаметр станины):

$$D_2 = 0,9 d_{\text{с}} = 0,9 \cdot 278 \cdot 10^{-3} = 250 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

174. Окружная скорость вентилятора (по наружному диаметру)

$$v_2 = \pi D_2 n / 60 = \pi \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 1500 / 60 = 19,6 \text{ м/с}.$$

175. Внутренний диаметр колеса вентилятора

$$D_1 = (1,25 \sim 1,3) D = 1,25 \cdot 156 \cdot 10^{-3} = 195 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

176. Окружная скорость вентилятора (по внутреннему диаметру)

$$v_1 = \pi D_1 n / 60 = \pi \cdot 195 \cdot 10^{-3} \cdot 1500 / 60 = 15,3 \text{ м/с}.$$

177. Ширина лопаток вентилятора

$$b_{\text{л.в}} = (0,12 \div 0,15) D_2 = 0,15 \cdot 250 \cdot 10^{-3} = 38 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

178. Число лопаток принимаем $N_1 = 17$

179. Давление вентилятора при холостом ходе

$$H_0 = \eta_{a0} \rho (v_2^2 - v_1^2) = 0,6 \cdot 1,2 \cdot (19,6^2 - 15,3^2) = 108 \text{ Па},$$

где η_{a0} — аэродинамический КПД вентилятора в режиме холостого хода: $\eta_{a0} = 0,6$.

180. Максимально возможное количество воздуха в режиме короткого замыкания

$$Q_{вmax} = 0,42 v_2 S_2 = 0,42 \cdot 19,6 \cdot 0,0275 = 0,227 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $S_2 = 0,92 D_2 b_{л.в} = 0,92 \pi \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 38 \cdot 10^{-3} = 0,0275 \text{ м}^2$ – входное сечение вентилятора.

181. Аэродинамическое сопротивление Z вентиляционной системы машины (см. рис. 7.5)

$$Z = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6.$$

182. Действительный расход воздуха по (10.159)

$$Q_{воз} = Q_{вmax} \sqrt{\frac{H_0}{H_0 + Z Q_{вmax}^2}} = 0,227 \sqrt{\frac{108}{108 + 1,4 \cdot 10^3 \cdot 0,227^2}} =$$

$$= 0,176 \text{ м}^3/\text{с}.$$

183. Действительное давление вентилятора

$$H = \frac{H_0 Z Q_{вmax}^2}{H_0 + Z Q_{вmax}^2} = \frac{108 \cdot 1,4 \cdot 10^3 \cdot 0,227^2}{108 + 1,4 \cdot 10^3 \cdot 0,227^2} = 43,45 \text{ Па}.$$

184. Мощность, потребляемая вентилятором, по (7.135)

$$P_{в} \approx 0,175 \left(\frac{V_1}{10} \right)^2 Q_{ном} \cdot 10^3 = 0,175 \left(\frac{15,3}{10} \right)^2 0,177 \cdot 10^3 = 72 \text{ Вт}.$$

185. Потери мощности на вентиляцию и в подшипниках (уточнение п. 134)

$$P_{т} = P_{тщ} + P_{т.мех} + P_{вент} = 58,8 + 55 + 72 = 186 \text{ Вт},$$

где $P_{т.мех}$ принимается ориентировочно $P_{т.мех} = \frac{1}{2} (P_{т} + P_{вент})$.

186. Номинальный КПД электрической машины (см. п. 142), уточненный по результатам вентиляционного расчета,

$$\eta_{ном} = P_{ном} \cdot 100 / (P_{ном} + \Sigma P) = 11000 \cdot 100 / 13120 = 83,8 \text{ \%}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет массы двигателя и механический расчет вала выполняются согласно приведенным в соответствующих главах настоящего учебника примерам расчетов асинхронных и синхронных машин.

При разработке конструкции двигателя необходимо использовать материалы гл. 10, а также чертежи конструкций серийных электродвигателей, ГОСТ на установочные размеры и размеры выступающего конца вала (см. приложение 6).

Механический расчет коллектора и крепления главных и добавочных полюсов выполняется по методике, изложенной в гл. 11.

Контрольные вопросы

1. Укажите основные особенности построения общепромышленных серий 2П и 4П.
2. Какие ограничения необходимо учитывать при выборе индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки машины постоянного тока?
3. Какие типы обмоток находят применение в машинах постоянного тока мощностью до 200 кВт?
4. Как учитывается МДС компенсационной обмотки при расчете добавочных полюсов?
5. Каким образом учитывают МДС реакции якоря при расчете стабилизирующей обмотки?
6. Как влияет ширина щетки на коммутационную напряженность машины постоянного тока?

Глава одиннадцатая

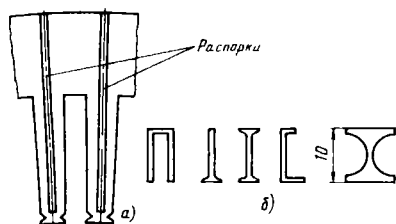
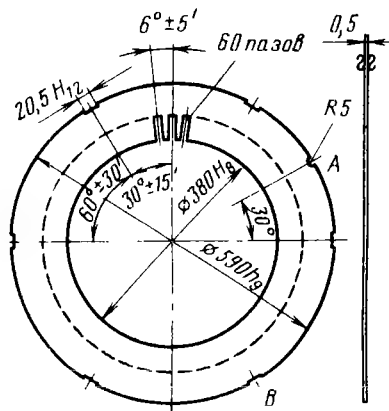
ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

11.1. МАГНИТОПРОВОД СТАТОРА

Магнитопроводы статора машин переменного тока общего назначения выполняют шихтованными из электротехнической стали толщиной 0,35–0,55 мм. При внешнем диаметре магнитопровода до 990 мм он выполняется из целых листов (рис. 11.1), а при больших диаметрах собирают из отдельных сегментов (см. рис. 9.14). По внутренней поверхности магнитопровода штампуют пазы требуемой формы для размещения в них обмотки статора. Так как в размерах отдельных зубцов имеется разброс, обусловленный допусками при изготовлении штампа, то при шихтовке магнитопровода листы укладываются в одно и то же положение относительно друг друга по шихтовочному знаку *A*, который вырубает на внешней поверхности. Для изоляции листов друг от друга их после снятия заусенцев лакируют. Если листы изготовляют из стали 2013, то их подвергают термообработке, в результате которой уменьшаются потери в стали и на поверхности создается оксидный изоляционный слой.

При большой длине магнитопровода его делят на пакеты, между которыми выполняют вентиляционные радиальные каналы шириной 10 мм путем приварки к крайним листам пакета распорок (рис. 11.2), имеющих чаще всего двутавровое сечение.

При внешнем диаметре до 452–493 мм магнитопровод набирают из целых листов, насаживая их на цилиндрическую оправку диаметром, равным внутреннему диаметру статора. Для предотвращения деформации (распушения) относительно тонких зубцов торцевые листы магнитопровода штампуют из более толстых листов стали или их попарно сваривают точечной сваркой. Собранный таким образом магнитопровод прессуют и после этого скрепляют по внешнему диаметру *П*-образными



скобами (рис. 11.3). Скобы приваривают к торцам и к внешней поверхности магнитопровода или, как это сделано у машин серии 4А, укладывают в специальные канавки В (см. рис. 11.1) в форме ласточкина хвоста на внешней поверхности магнитопровода (см. рис. 8.2, б). После укладки обмотки и пропитки ее лаком магнитопровод запрессовывают в станину и закрепляют стопорными винтами.

Иногда в асинхронных машинах небольших габаритов ($h < 63$ мм) спрессованный магнитопровод покрывают тонкостенной оболочкой из алюминия или алюминиевого сплава (рис. 11.4). Эта оболочка охваты-

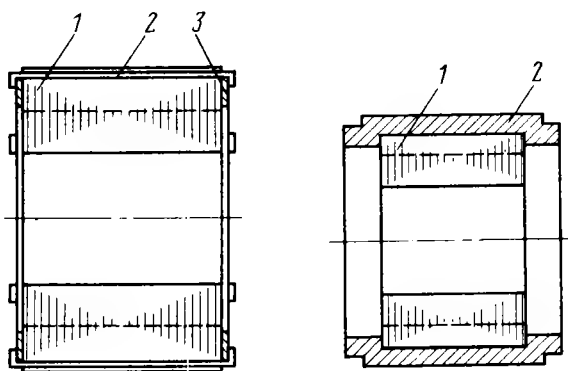


Рис. 11.3. Магнитопровод статора, стянутый скобами:
1 — магнитопровод; 2 — скоба; 3 — нажимная шайба

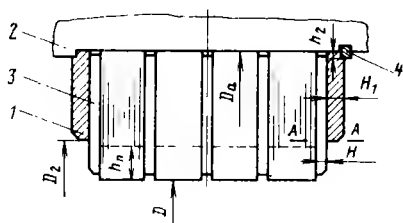


Рис. 11.5. Магнитопровод статора, запрессованный нажимными шайбами:

1 – нажимная шайба; 2 – ребро станины; 3 – нажимные пальцы; 4 – запорная шпонка

ваит внешнюю и частично торцевые поверхности магнитопровода. Она скрепляет пакет и заменяет собой станину. Оболочка выполняется в формах на специальных машинах для литья под давлением. Такое изготовление статора экономически более выгодно по сравнению с изготовлением его с чугунной станиной.

При внешних диаметрах магнитопровода от 520 до 990 мм он собирается из листов, которые укладываются в расточенный корпус или на обработанные ребра (рис. 11.5). Магнитопровод скреплен двумя нажимными шайбами (кольцами). Для создания осевого сжатия у одного края ребра имеется выступ, а у другого края – канавка, в которую вставляется запорная шпонка. Нажимная шайба передает усилие сжатия на магнитопровод через нажимные пальцы – стальные пластинки, приваренные к крайним листам.

При внешних диаметрах магнитопровода более 990 мм он собирается из сегментов. Различают слоевую шихтовку, при которой каждый слой состоит из целого числа сегментов, и винтовую, при которой в каждом слое последний сегмент перекрывает предыдущий.

Для шихтовки магнитопровода из сегментов существуют несколько способов крепления листов в корпусе. В машинах общего назначения наибольшее распространение находит способ крепления на сборочных шпильках 5, которые одновременно являются и стяжными (рис. 11.6). Базирование магнитопровода в радиальном направлении происходит на ребрах станины 1.

При механическом расчете магнитопровода проверяют прочность стягивающих его узлов.

При запрессовке магнитопровода шайбами проверяют прочность этих шайб, нажимных пальцев и шпонки. При стяжке магнитопровода шпильками выбирают их размер и число.

При расчете исходят из того, что давление в запрессованном магнитопроводе q_c находится в пределах $7 \cdot 10^5 - 10^6$ Па. Принимают, что образование веера в торцах зубцового слоя не снижает давления и реакции запрессовки. Такое допущение упрощает расчетные формулы.

Расчет нажимных шайб, пальцев и шпонок. На нажимные пальцы и шайбу действует изгибающий момент, созданный равномерным давлением спрессованного магнитопровода.



Рис. 11.6. Магнитопровод статора, стянутый шпильками:

1 - ребро станины; 2 - нажимное кольцо; 3 - нажимные пальцы; 4 - "глухая" стенка станины; 5 - сборочные шпильки

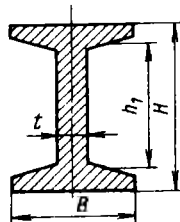


Рис. 11.7. Размеры двутаврового сечения нажимного пальца

Полное усилие запрессовки, Н,

$$Q_3 = q_c (T_{c1} D_a^2 - S_{\Pi}), \quad (11.1)$$

где T_{c1} - коэффициент, который определяется в зависимости от $\alpha = D/D_a$ (см. рис. 11.5): $T_{c1} = 0,785(1 - \alpha^2)$; S_{Π} - площадь сечения всех пазов статора, м^2 ; D_a - внешний диаметр магнитопровода статора, м.

Диаметр равнодействующей усилия запрессовки, м,

$$D_p = \frac{T_2 D_a^3 - S_{\Pi} (D + h_{\Pi})}{T_{c1} D_a^2 - S_{\Pi}}, \quad (11.2)$$

где $T_2 = 0,524(1 - \alpha^3)$ - коэффициент; h_{Π} - высота паза, м.

Момент, изгибающий нажимную шайбу, Н·м,

$$M_1 = Q_3 (D_a - D_p) / 2. \quad (11.3)$$

Напряжение изгиба, Па,

$$\sigma_1 = \frac{6 M_1}{\pi \left(\frac{D_a + D_2}{2} \right) H_1^2}, \quad (11.4)$$

где D_a , D_2 , H_1 - в м (см. рис. 11.5).

Допустимое напряжение ограничено условием необходимой жесткости нажимной шайбы. Для стали марки Ст3 $\sigma_{\text{доп}} = 600 \cdot 10^5$ Па.

Изгибающий момент, действующий на нажимные пальцы крайних листов сердечника в сечении А-А (см. рис. 9.5), Н·м,

$$M_2 = \frac{q_c}{Z_1} \left[\left(\frac{D_2}{10} \right)^3 T_3 - \frac{S_{\Pi}}{2} (D_2 - D - h_{\Pi}) \right], \quad (19.5)$$

где $T_3 = 131(1 - \alpha_1)^2(1 + 2\alpha_1)$; $\alpha_1 = D/D_2$; Z_1 — число пазов.

Напряжение изгиба пальцев, Па:

при двутавровом сечении пальца (рис. 11.7)

$$\sigma_2 = 6HM_2/(BH^3 - b_1h_1^3), \quad (11.6)$$

где $B, H, h_1, b_1 = B - t$ — размеры в метрах по рис. 11.7;

при прямоугольном сечении пальца

$$\sigma_2' = 6M_2/(BH^2). \quad (11.7)$$

Допустимое напряжение для пальцев из стали марки Ст3 равно 1600×10^5 Па.

Напряжение смятия шпонки, Па,

$$\sigma_{см} = Q_3/(mb_2h_2), \quad (11.8)$$

где m — число шпонок; b_2, h_2 — размеры контактной поверхности одной шпонки, м.

Допустимое напряжение $\sigma_{см} = 1500 \cdot 10^5$ Па.

Пример. Исходные данные: синхронный двигатель $P_{ном} = 200$ кВт, $D_g = 74 \cdot 10^{-2}$ м, $D = 54 \cdot 10^{-2}$ м, $D_2 = 65,4 \cdot 10^{-2}$ м, $Z_1 = 72$, $h_{п} = 4,65 \cdot 10^{-2}$ м, $b_{п} = 1,23 \cdot 10^{-2}$ м. Размеры пальца: $H = 1,054 \cdot 10^{-2}$ м, $B = 0,6 \cdot 10^{-2}$ м. Контактная поверхность шпонки $b_2 \cdot h_2 = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 \cdot 10^{-2}$ м², для шайбы $H_1 = 1,7 \cdot 10^{-2}$ м, число шпонок $m = 6$,

$$\alpha = 54/74 = 0,73, T_{c1} = 0,785(1 - 0,73^2) = 0,37.$$

Площадь сечения всех пазов статора $S_{п} = 72 \cdot 1,23 \cdot 10^{-2} \cdot 4,65 \cdot 10^{-2} = 412 \times 10^{-4}$ м².

Усилие запрессовки по (11.1)

$$Q_3 = 8 \cdot 10^5 (0,37 \cdot 74^2 \cdot 10^{-4} \cdot 412 \cdot 10^{-4}) = 12,91 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Из (11.2)

$$D_p = \frac{0,32 \cdot 74^3 \cdot 10^{-6} - 412 \cdot 10^{-4} (54 + 4,65) \cdot 10^{-2}}{0,37 \cdot 74^2 \cdot 10^{-4} - 412 \cdot 10^{-4}} = 65,28 \cdot 10^{-2} \text{ м;}$$

$$T_2 = 0,524(1 - 0,73^3) = 0,32.$$

Изгибающий момент по (11.3)

$$M_1 = \frac{12,91 \cdot 10^4 (74 - 65,28) \cdot 10^{-2}}{2} = 59,29 \cdot 10^2 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Напряжение изгиба по (11.4)

$$\sigma_1 = \frac{6 \cdot 56,29 \cdot 10^2}{\pi \left(\frac{74 + 65,4}{2} \right) \cdot 10^{-2} \cdot 1,7^2 \cdot 10^{-4}} = 534 \cdot 10^5 \text{ Па,}$$

где при $\alpha_1 = D/D_2 = 54/65,4 = 0,826$ получаем $T_3 = 131(1 - 0,826)^2(1 + 2 \times 0,826) = 10,51$.

Из (11.5)

$$M_2 = \frac{8 \cdot 10^5}{72} \left[\left(\frac{65,4}{10} \right)^3 \cdot 10^{-6} \cdot 10,51 - \frac{412 \cdot 10^{-4}}{2} (65,4 - 54 - 4,65) \cdot 10^{-2} \right] = 17,22 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Напряжение изгиба пальцев по (11.7)

$$\sigma'_2 = 6 \cdot 17,22 / (0,6 \cdot 1,05^2 \cdot 10^{-6}) = 1562 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Напряжение смятия по (11.8)

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{12,91 \cdot 10^4}{6 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 \cdot 10^{-2}} = 1076 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Расчет числа и диаметра шпилек. Расчет производится по усилию запрессовки магнитопровода, определяемому по (11.1).

Число шпилек

$$m_{\text{ш}} \geq Q_3 / (\sigma S_0), \quad (11.9)$$

где $S_0 = \pi d_{0\text{ш}}^2 / 4$ — площадь сечения шпильки по нарезке, м^2 ; $d_{0\text{ш}}$ — внутренний диаметр резьбы шпильки, м .

Допустимое напряжение σ для шпилек из стали марки Ст3 равно $1600 \cdot 10^5$ Па, из стали марки Ст5 $2100 \cdot 10^5$ Па.

Нажимные пальцы рассчитываются так же, как и в предыдущем случае.

Пример. Синхронный двигатель: $D_a = 1,73 \text{ м}$, $D = 1,2 \text{ м}$, $Z_1 = 72$, $b_{\text{п}} = 1,87 \times 10^{-2} \text{ м}$, $h_{\text{ш}} = 8,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $\alpha = 1,20/1,73 = 0,69$, $T_{\text{с1}} = 0,785(1 - 0,69^2) = 0,41$.
Из (11.1)

$$Q_3 = 8 \cdot 10^5 (0,41 \cdot 1,73^2 - 72 \cdot 1,87 \cdot 10^{-2} \cdot 8,5 \cdot 10^{-2}) = 8,96 \cdot 10^5 \text{ Н}.$$

Выбираем шпильки М36 ($S_0 = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$) из стали марки Ст3.
По (11.9)

$$m_{\text{ш}} \geq \frac{8,96 \cdot 10^5}{1600 \cdot 10^5 \cdot 7,4 \cdot 10^{-4}} = 7,56.$$

Выбираем 8 шпилек.

Бандажные кольца обмотки статора. При протекании тока по обмотке статора на ее лобовые части действуют электродинамические силы, которые стремятся отогнуть их к магнитопроводу. Особенно велики эти силы при внезапных коротких замыканиях, когда токи возрастают в несколько раз по сравнению с их номинальным значением. Для предупреждения отгиба лобовых частей применяется крепление их с помощью бандажных колец (рис. 11.8). Необходимость применения бан-

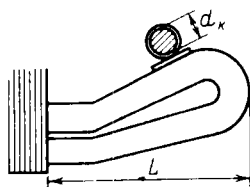


Рис. 11.8. К определению числа бандажных колец

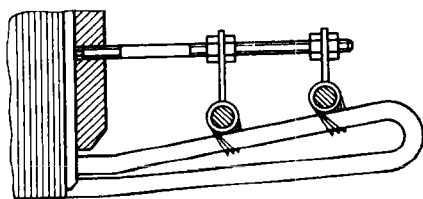
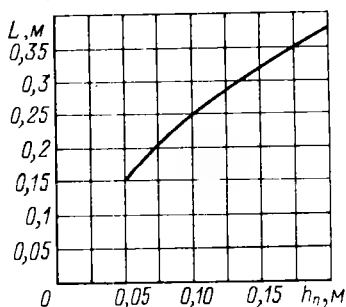


Рис. 11.9. Крепление бандажных колец с помощью шпилек

дажных колец определяется вылетом лобовых частей L и высотой паза h_n . Если длина вылета при данной высоте паза лежит выше кривой (рис. 11.8), то установка бандажных колец необходима. Число колец m_k определяется из следующего расчета: одно кольцо на каждые 100 мм вылета лобовой части сверх значения, ограниченного кривой на рис. 11.8.

Сечение колец выбирают по растягивающему усилию, испытываемому кольцом при внезапном коротком замыкании, Н,

$$Q_k = \frac{1,11}{m_k} \left(\frac{D}{2px_*} \right)^2 \cdot 10^4, \quad (11.10)$$

где D — внутренний диаметр магнитопровода, м; $2p$ — число полюсов; x_* — относительное переходное реактивное сопротивление обмотки статора (находится из электромагнитного расчета); для предварительных расчетов можно принять у синхронных явнополюсных машин $x_* = 0,2 \div 0,3$, у короткозамкнутых асинхронных двигателей $x_* = 0,15 \div 0,25$, у асинхронных двигателей с фазным ротором $x_* = 0,25 \div 0,4$.

Напряжение растяжения в кольце, Па,

$$\sigma = Q_k / S_k, \quad (11.11)$$

где $S_k = \pi d_k^2 / 4$; d_k — диаметр кольца, м.

Тогда

$$d_k = \sqrt{4Q_k / (\pi\sigma)}. \quad (11.12)$$

При доброкачественной сварке кольца из стали марки Ст3 допустимое напряжение растяжения $\sigma = 1800 \cdot 10^5$ Па. Бандажные кольца изготавливают из прутков диаметрами 10, 12, 16, 20, 24 мм и прутков квадратного сечения 22×22 и 32×32 мм². В машинах с внешним диаметром магнитопровода статора более 1 м к бандажным кольцам приваривают петли, которые крепят с помощью шпилек к нажимным шайбам статора (рис. 11.9).

Число шпилек выбирают в зависимости от диаметра сердечника: принимают 4 шпильки при диаметрах от 1 до 2 м, 6 шпилек при диаметрах от 2 до 2,6 м и 8 шпилек при диаметрах свыше 2,6 м.

Пример. Даны: $D = 1,2$ м, $h_{\Pi} = 8,5 \cdot 10^{-2}$ м, $x_* = 0,15$, вылет лобовой части обмотки 23,4 см.

При высоте паза $h_{\Pi} = 75$ мм вылет лобовой части равен 23,4 см, поэтому бандажные кольца необходимы ($23,4 > 21,5$ см). Принимаем $m_K = 1$, тогда: по (11.10)

$$Q_K = \frac{1,11}{1} \left(\frac{1,2}{6 \cdot 0,15} \right)^2 \cdot 10^4 = 1,973 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

по (11.12)

$$d_K = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,973 \cdot 10^4}{\pi \cdot 1800 \cdot 10^5}} = 0,0118 \text{ м}.$$

Для изготовления кольца выбирается пруток диаметром 12 мм.

11.2. СТАНИНЫ

Станины статоров электрических машин выполняют литыми, сварными или из труб. В машинах переменного тока станина является каркасом, в котором располагается магнитопровод статора с обмоткой. Конструкция станины зависит от степени защиты машины.

Для асинхронных двигателей закрытого исполнения (степень защиты IP44) (см. рис. 8.1) применяют литые чугунные станины цилиндрической формы. Для улучшения охлаждения машины на внешней поверхности станины отливают продольные ребра (при $h \leq 355$ мм) или приваривают распределенный воздухоохладитель, состоящий из двух-трех рядов стальных трубок диаметром 32–40 мм (при $h \geq 400$ мм). Между ребрами или через трубки воздухоохладителя наружным вентилятором, расположенным на валу машины, прогоняется охлаждающий воздух. Высоту ребер h_p выбирают равной $(0,15-0,2)h$. Число ребер, приходящихся на четверть поверхности станины, выбирают от 8 до 12.

Внутренняя поверхность станины у машин небольшой мощности гладкая, обработана для посадки магнитопровода статора, а у более крупных машин (при $h > 400$ мм) для закрепления магнитопровода на ней предусматривают продольные ребра.

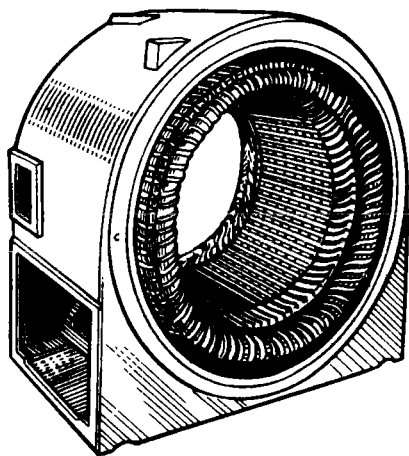


Рис. 11.10. Литая станина с впессованным магнитопроводом

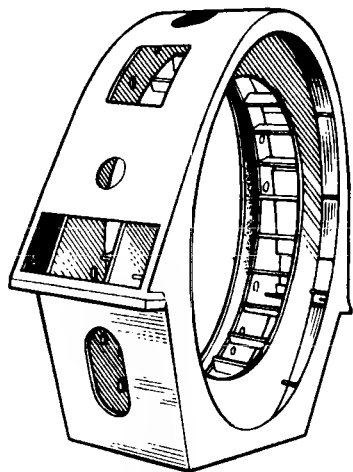


Рис. 11.11. Сварная станина

У двигателей защищенного исполнения (степень защиты IP23) (см. рис. 8.2) станины выполняют литыми с гладкой внешней поверхностью, а на внутренней поверхности имеются 4—6 ребер для посадки магнитопровода. В боковых частях станины предусматривают отверстия для выхода охлаждающего воздуха. Отверстия закрывают жалюзи, которые штампуют из стали или выполняют из алюминиевых сплавов.

В синхронных машинах относительной небольшой мощности станины также выполняют литыми (рис. 11.10).

Для машин переменного тока большой мощности (больше сотен киловатт) чаще всего применяют сварные станины. Сварные станины выполняют в виде кольцевой коробки П-образного сечения и состоят из ряда продольных балок, приваренных к боковым кольцам (рис. 11.11). В машинах общего назначения чаще всего применяют станины с "глухой" наружной стенкой (см. рис. 11.6). Одна из торцевых наружных стенок такой станины имеет отверстие, диаметр которого меньше внешнего диаметра магнитопровода (глухая стенка). К этой стенке приваривают нажимные пальцы 3. Вторая торцевая стенка открытая, и через нее ведут шихтовку магнитопровода. К этой стенке после прессовки магнитопровода приваривают нажимное кольцо 2 с пальцами 3.

В машинах постоянного тока станина, кроме того, что к ней прикрепляют главные и добавочные полюсы, является частью магнитопровода. В целях уменьшения размеров подшипниковых щитов и повышения их жесткости иногда увеличивают длину станины. Развита в сторону под-

подшипниковых щитов часть станины может иметь меньшую толщину. Толщину станины определяют из электромагнитного расчета. Полученные размеры станины обеспечивают ее достаточную прочность и жесткость. В машинах постоянного тока станины как при защищенном (степень защиты IP22), так и при закрытом исполнении (степень защиты IP44) (см. рис. 10.3) имеют гладкую внешнюю поверхность. При высотах оси вращения до 200 мм станины выполняют из цельнотянутых стальных труб, а при больших высотах оси вращения сваривают из толстолистовой стали, свернутой в трубу. Сварной шов целесообразно располагать по линии главных полюсов, чтобы исключить влияние этого шва на распределение магнитного потока. В удлиненных станинах предусматривают люки для обслуживания коллектора и подачи охлаждающего воздуха.

Для улучшения работы двигателей постоянного тока при питании их от тиристорных преобразователей целесообразно магнитопровод статора выполнять шихтованным из листов электротехнической стали толщиной 0,5–1 мм, а затем запрессовывать его в литой корпус.

При проектировании станины электрической машины в нижней ее части должны быть предусмотрены лапы, с помощью которых она крепится к фундаменту. Расположение лап на станине должно быть таким, чтобы можно было свободно вставлять в их отверстия крепящие машину болты, а в машинах постоянного тока – еще и не затруднять установку и выем болтов, крепящих полюсы. Опорные лапы либо отливают заодно со станиной, либо изготавливают отдельно. Кроме того, на станине должны быть окна и приваренные или отлитые основания для размещения коробки вводных проводов.

В верхней части станины делают приливы или приваривают бобышки, в которых высверливают отверстия и нарезают резьбу для рым-болтов. В малых машинах делают один рым-болт, а у более крупных – два. При массе машины менее 30 кг рым-болт отсутствует. Станины должны иметь зажим для заземления.

При внешнем диаметре станины менее 1–1,5 м к ее торцам болтами привертывают подшипниковые щиты, для чего на торцах должны быть выполнены кольцевые заточки для посадки и предусмотрены приливы или ушки с нарезанными отверстиями для крепления щитов. При больших диаметрах станин применяют стояковые подшипники.

В последнее время получили распространение станины прямоугольной формы. Машина такой формы лучше вписывается в интерьер производственных помещений, гармонируя с прямыми линиями колонн, окон, станков и т.п. Кроме того, при прямоугольной форме станины удастся лучше использовать ее внутренний объем и за счет этого уменьшить размеры машины.

11.3. ВАЛЫ

Электрические машины общего назначения в большинстве случаев выполняют с горизонтальным расположением вала. В этом случае вал несет на себе всю массу вращающихся частей, через него передается вращающий момент машины. При сочленении машины с исполнительным механизмом (для двигателя) или с приводным двигателем (для генератора) через ременную или зубчатую передачу, а также и через муфту на вал действуют дополнительные изгибающие силы. Кроме того, на вал могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, усилия, появляющиеся из-за наличия небаланса вращающихся частей, а также усилия, возникающие при появлении крутильных колебаний. Правильно сконструированный вал должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать все действующие на него нагрузки без появления остаточных деформаций. Вал должен также иметь достаточную жесткость, чтобы при работе машины ротор не задевал о статор. Критическая частота вращения вала должна быть значительно больше рабочих частот вращения машины. При критической частоте вращения вынуждающая сила небаланса имеет частоту, равную частоте собственных поперечных колебаний вала (т.е. наступает явление резонанса), при которой резко увеличиваются прогиб вала и вибрация машины.

Валы изготовляют из углеродистых сталей, преимущественно из стали марки 45. Для повышения механических свойств сталей их подвергают термической обработке.

Размеры вала определяют при разработке конструкции. Валы имеют ступенчатую форму с большим диаметром в месте посадки магнитопровода ротора. Число ступеней вала зависит от количества узлов машины, размещаемых на нем (магнитопровод, коллектор, подшипники, вентилятор, контактные кольца и т.д.). При переходе с одного диаметра вала на другой для предупреждения недопустимой концентрации напряжений в местах переходов должны быть предусмотрены закругления (галтели) максимально возможного радиуса. Отношение радиуса галтели к диаметру вала должно быть больше 0,05. По этой же причине не следует применять отношение диаметров соседних ступеней вала более 1,3. Иногда для фиксации положения пакета магнитопровода ротора на валу предусматривается упорный буртик. Диаметр вала, см, в той его части, где размещается магнитопровод, предварительно можно выбрать по формуле

$$d_c = k_b \sqrt[3]{P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}}}, \quad (11.13)$$

где $P_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$ — номинальные значения соответственно мощности, кВт, частоты вращения, об/мин; k_b — коэффициент, значение которого следует принять равным 24–29 для машины средней мощности и 18–20 для крупных машин (от 400 кВт и выше).

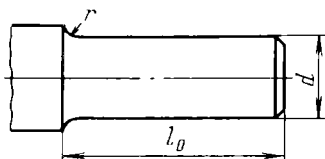


Рис. 11.12. Свободный конец вала

Окончательные размеры вала устанавливаются после его расчетов на жесткость и прочность. Свободный конец может иметь цилиндрическую или коническую форму. Широкое применение имеют валы с цилиндрическим концом. На этот конец насаживают полумуфту, или шкив, или шестерню, которые закрепляют с помощью шпонки. На валу имеется еще ряд шпонок для закрепления различных узлов, размещаемых на валу. В целях упрощения обработки вала ширину всех шпонок желательно брать такой же, как и у свободного конца.

Размеры свободного конца вала (рис. 11.12) должны быть выбраны в соответствии с ГОСТ 18709-73 и ГОСТ 20839-75 (табл. 11.1). Концы валов предусматриваются двух исполнений – длинные и короткие.

Шпонки для свободного конца вала выбирают по стандартам.

При конструировании следует также согласовать размеры шеек вала, на которых размещают подшипники, с размерами выбранных подшипников.

Расчет вала на жесткость. При расчете прогиба вала принимают, что вся масса активной стали ротора с обмоткой и коллектором (в машинах постоянного тока) и участка вала под ними приложена в виде сосредоточенной силы G_p посередине длины магнитопровода. Массу указанных частей определяют по данным электромагнитного расчета. Массой остальных частей вала можно пренебречь.

Принимая, что ротор асинхронного двигателя или якорь машины постоянного тока представляют собой сплошной цилиндр с плотностью 8300 кг/м^3 , его массу можно определить как

$$m_p = 6500 D_2^2 l_2.$$

Масса ротора синхронной машины приближенно равна:

$$m_{p\ c} \approx 6260 D_2^2 l_j,$$

а масса коллектора

$$m_k = 6100 D_k^2 l_k,$$

где D_2 – внешний диаметр ротора (якоря), м; l_2 – длина сердечника без радиальных вентиляционных каналов, м; D_k , l_k – внешний диаметр и длина коллектора, м; l_j – длина ротора.

Таблица 11.1. Цилиндрические концы валов

d, мм	l ₀ , мм		d, мм	l ₀ , мм	
	Исполнение			Исполнение	
	1	2		1	2
7	16	—	80		
9	20	—	85	170	130
11	23	—	90		
14	30	—	95		
16			100		
18	40	28	110	210	165
19			125		
22			140	250	200
24	50	36	150	250	210
28	60	42	160		
32			170	300	240
38	80	58	180		
42			190		
48	100	82	200	350	280
55			220		
60			250	410	330
65			280		
70	140	105	320	470	380
75			360	550	450

В машинах постоянного тока в том случае, когда коллектор насаживается на вал, расчет прогиба проводят исходя из приведенной силы тяжести:

$$G_p = G_p' + \varphi G_k = 9,81(m_p + \varphi m_k), \quad (11.14)$$

где m_p — масса якоря с обмоткой и валом, кг; m_k — масса коллектора с валом под ним, кг; φ — коэффициент, который принимают из табл. 11.2 в зависимости от отношений b/l и a_1/l (рис. 11.13).

При креплении корпуса коллектора к корпусу якоря масса коллектора учитывается как прибавка к массе якоря.

При определении прогиба вала воспользуемся аналитическим методом. Для этого необходимо иметь эскиз вала со всеми его размерами

b/l	a_1/l					
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
0,3	0,6	0,84	1,02	1,12	1,12	1
0,4	0,55	0,77	0,94	1,03	1	0,86
0,5	0,56	0,78	0,94	1	0,94	0,78
0,6	0,62	0,86	1	1,03	0,94	0,77
0,7	0,75	1	1,12	1,12	1,02	0,82

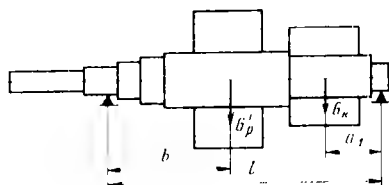
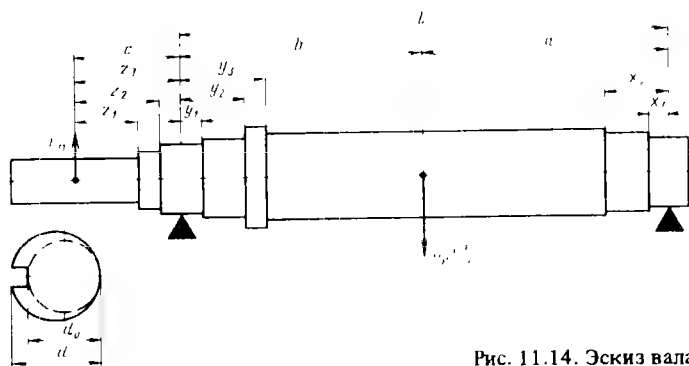
Рис. 11.13. К определению коэффициента φ 

Рис. 11.14. Эскиз вала

(рис. 11.14). Вал разбивают на три участка: a , b и c . Прогиб вала, м, под действием силы G_p на участке, соответствующем середине магнитопровода,

$$f_G = \frac{G_p}{3El^2} (S_b a^2 + S_a b^2), \quad (11.15)$$

где E — модуль упругости: $E = 2,06 \cdot 10^{11}$ Па;

$$S_a = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}; \quad S_b = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}; \quad (11.16)$$

J_i – экваториальный момент инерции вала, м^4 ; для сплошного вала диаметром d имеем $J = \pi d^4/64$, для полого вала $J = \pi(d^4 - d_{\text{отв}}^4)/64$; $G_p = 9,81 m_p$ – сила тяжести ротора, Н.

В (11.15) все линейные размеры должны быть приняты в метрах. Расчет f_G удобно представить в виде таблицы (см. пример расчета).

Электрическая машина сочленяется с исполнительным механизмом или двигателем одним из указанных способов: через ременную передачу, зубчатую передачу или через упругую муфту. При работе машины возникают поперечные силы $F_{\text{п}}$, приложенные к выступающему концу вала и соответственно вызванные натяжением ремня, давлением на зубец шестерни или же неточностью сопряжения валов и изготовлением деталей муфты. Эту силу $F_{\text{п}}$, Н, можно определить как

$$F_{\text{п}} = k_{\text{п}} M_{\text{ном}}/R, \quad (11.17)$$

где $M_{\text{ном}}$ – номинальный вращающий момент, Н·м:
для двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9550 P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}};$$

для генератора

$$M_{\text{ном}} = 9550 P_{\text{ном}}/(\eta n_{\text{ном}});$$

(11.18)

$P_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$ – номинальные мощность, кВт, и частота вращения, об/мин; $k_{\text{п}}$ – коэффициент, при передаче упругой муфтой $k_{\text{п}} = 0,3$, при передаче зубчатыми шестернями $k_{\text{п}} = 1,05$, при передаче клиновыми ремнями $k_{\text{п}} = 1,8$, при передаче плоскими ремнями $k_{\text{п}} = 3$; R – радиус делительной окружности шестерни или радиус по центрам пальцев муфты или окружности шкива, м.

Сила $F_{\text{п}}$ вызывает дополнительный прогиб вала под серединой магнитопровода:

$$f_{\text{п}} = \frac{F_{\text{п}} c}{3EI^2} \left[\left(\frac{3}{2} l S_0 - S_{\text{в}} \right) a + S_a b \right], \quad (11.19)$$

где $S_0 = \sum \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$ (рис. 11.14 и табл. 11.3), c – расстояние от точки приложения силы $F_{\text{п}}$ до ближайшей опоры, м.

При сочленении валов с помощью шкива или зубчатой шестерни точка приложения силы $F_{\text{п}}$ лежит в середине свободного конца вала (рис. 11.14). При сочленении валов эластичной муфтой сила приложения лежит посередине упругой части пальцев.

Прогиб вала вызывают также силы одностороннего магнитного притяжения, которые возникают, если ротор будет смещен из центрального

Таблица 11.3

№ участка	$d_i, \text{м}$	$J_i, \text{м}^4$	$y_i, \text{м}$	$y_i^3, \text{м}^3$
Левая часть				
1	$11 \cdot 10^{-2}$	$718 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$15,62 \cdot 10^{-6}$
2	$13,5 \cdot 10^{-2}$	$1630 \cdot 10^{-8}$	$11 \cdot 10^{-2}$	$1331 \cdot 10^{-6}$
3	$15 \cdot 10^{-2}$	$2484 \cdot 10^{-8}$	$49,1 \cdot 10^{-2}$	$118\,371 \cdot 10^{-6}$
$S_b = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i} =$				
№ участка	$d_i, \text{м}$	$J_i, \text{м}^4$	$x_i, \text{м}$	$x_i^3, \text{м}^3$
Правая часть				
1	$11 \cdot 10^{-2}$	$718 \cdot 10^{-8}$	2,5	$15,62 \cdot 10^{-6}$
2	$13,5 \cdot 10^{-2}$	$1630 \cdot 10^{-8}$	11	$1331 \cdot 10^{-6}$
3	$15 \cdot 10^{-2}$	$2484 \cdot 10^{-8}$	43,1	$80\,063 \cdot 10^{-6}$
$S_a = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i} =$				

положения по отношению внутреннего диаметра статора. Первоначальное смещение ротора происходит вследствие неточности обработки, износа подшипников и прогиба вала под действием сил G_p и F_n . Первоначальное смещение ротора, м, принимают равным:

$$e_0 = 0,1\delta + f_G + f_n, \quad (11.20)$$

где δ – воздушный зазор, м.

Вследствие смещения ротора магнитные потоки полюсов будут неодинаковыми. У полюсов, расположенных со стороны меньших воздушных зазоров, потоки больше. Соответственно больше и сила поперечного магнитного притяжения. Силу одностороннего магнитного притяжения, Н, вызванную смещением ротора на e_0 , определяют по формуле

$$T_0 = 2,94 D_2 l_2 \frac{e_0}{\delta} 10^5, \quad (11.21)$$

где D_2 – диаметр ротора, м; l_2 – длина ротора без радиальных каналов, м.

Сила T_0 вызывает дополнительный прогиб вала, который пропорционален прогибу f_G от силы тяжести ротора:

$y_i^3 - y_{i-1}^3, \text{м}^3$	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}, \text{м}^{-1}$	$y_i^2, \text{м}^2$	$y_i^2 - y_{i-1}^2, \text{м}^2$	$\frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}, \text{м}^{-2}$
$15,62 \cdot 10^{-6}$	$0,0217 \cdot 10^2$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$0,0087 \cdot 10^4$
$1315,38 \cdot 10^{-6}$	$0,807 \cdot 10^2$	$121 \cdot 10^{-4}$	$114,75 \cdot 10^{-4}$	$0,07 \cdot 10^4$
$117\,040 \cdot 10^{-6}$	$47,12 \cdot 10^2$	$2410,8 \cdot 10^{-4}$	$2296,05 \cdot 10^{-4}$	$0,924 \cdot 10^4$
$47,95 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$			$S_0 = \Sigma \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i} = 1 \cdot 10^4 \text{ м}^2$	

$x_i^3 - x_{i-1}^3, \text{м}^3$	$\frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}, \text{м}^{-1}$
$15,62 \cdot 10^{-6}$	$0,0217 \cdot 10^2$
$1315,38 \cdot 10^{-6}$	$0,807 \cdot 10^2$
$78\,732 \cdot 10^{-6}$	$31,7 \cdot 10^2$
$32,53 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$	

$$f_T = f_G T_0 / G_p. \quad (11.22)$$

Вследствие увеличения прогиба силы магнитного притяжения увеличатся, что вызовет дальнейшее увеличение прогиба. Так будет продолжаться до тех пор, пока магнитное притяжение и жесткость вала не уравновесятся, при этом установившийся прогиб под действием сил магнитного притяжения будет равен:

$$f_M = f_T / (1 - m), \quad (11.23)$$

где $m = f_T / c_0$.

Результирующий прогиб вала определяется для наихудшего случая, когда остальные составляющие прогибов суммируются:

$$f = f_M + f_G + f_n. \quad (11.24)$$

Для надежной работы машины выбор допустимого прогиба зависит от способа ее сочленения с исполнительным механизмом или двигателем.

При применении соединительной упругой муфты суммарный прогиб в процентах длины воздушного зазора должен составлять в асинхронных

двигателях не более 10 %, в синхронных машинах — не более 8 % и в машинах постоянного тока — не более 6 %. При сочленении посредством ременной передачи прогиб должен быть не более 10 % воздушного зазора. При ограничении перекоса зубьев при зубчатой передаче прогиб не должен превышать 10 % у асинхронных двигателей, 7 % у синхронных машин и 5 % у машин постоянного тока.

Критическая частота вращения. Для определения критической частоты вращения, об/мин, воспользуемся приближенной формулой, которая получена при учете одностороннего магнитного притяжения в предположении, что ротор представляет однородную систему:

$$n_k \approx 30 \sqrt{(1 - m)/f_G}. \quad (11.25)$$

Рабочая частота вращения ротора должна отличаться от критической не менее чем на 30 %.

Расчет вала на прочность. Вал электрических машин передает вращающий момент и, кроме того, испытывает изгибающие усилия от сил тяжести, магнитного притяжения и от поперечных сил на свободном конце. В результате этого вал испытывает совместное действие напряжения изгиба и напряжения кручения.

При совместном действии изгиба и кручения по теории наибольших касательных напряжений приведенное к случаю изгиба напряжение, Па, определяется по формуле

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma^2 + 4(\alpha\tau)^2}, \quad (11.26)$$

где σ — напряжение изгиба, Па; τ — напряжение кручения, Па; α — отношение допустимого напряжения при изгибе к удвоенному допускаемому напряжению при кручении.

Учитывая, что

$$\sigma = M_n / (0,1 d^3) \quad (11.27)$$

и

$$\tau = kM_{ном} / (0,2 d^3), \quad (11.28)$$

после подстановки их в (11.26) получаем расчетную формулу

$$\sigma_{пр} = \frac{1}{W} \sqrt{M_n^2 + (kaM_{ном})^2}, \quad (11.29)$$

где W — момент сопротивления при изгибе, м³, для вала диаметром d :

$$W = 0,1 d^3; \quad (11.30)$$

M_n — изгибающий момент в расчетном сечении, Н·м; $M_{ном}$ — номиналь-

ный вращающий момент, Н·м; k — коэффициент перегрузки, его в среднем можно принять равным 2–2,5.

Коэффициент α принимают равным 0,6 для нереверсивных машин и 0,8 для реверсивных.

Расчет вала на прочность заключается в определении напряжений в сечении каждой его ступени. Для этого необходимо для каждой ступени определить изгибающий момент с учетом перегрузки и момент сопротивления при изгибе. На участках вала, ослабленных шпоночными канавками, момент сопротивления определяется по диаметру d_0 (см. рис. 11.14). Изгибающий момент, Н·м:

для участка вала c (см. рис. 11.14)

$$M_{\text{и}} = k F_{\text{п}} z_i; \quad (11.31)$$

для участка b

$$M_{\text{и}} = k F_{\text{п}} c \left(1 - \frac{y_i}{l} \right) + (G_{\text{р}} + T) \frac{a y_i}{l}, \quad (11.32)$$

для участка a

$$M_{\text{и}} = [k F_{\text{п}} c + (G_{\text{р}} + T) b] \frac{x_i}{l}. \quad (11.33)$$

Нагрузка от установившегося магнитного притяжения, Н,

$$T = T_0 / (1 - m). \quad (11.34)$$

Расчетные значения $\sigma_{\text{пр}}$ сопоставляют с допускаемым для данного материала. Допускаемое значение напряжения не должно превышать 0,7 предела текучести. Для стали марки 45 предел текучести равен $3600 \cdot 10^5$ Па.

Пример. Рассчитать вал асинхронного двигателя, имеющего следующие данные: $M_{\text{ном}} = 3190$ Н·м, $n_{\text{ном}} = 585$ об/мин, масса ротора (включая среднюю часть вала) 753 кг, внешний диаметр магнитопровода ротора $D_2 = 55 \cdot 10^{-2}$ м, длина магнитопровода ротора без радиальных каналов $l_2 = 36,5 \cdot 10^{-2}$ м, воздушный зазор $\delta = 0,08 \cdot 10^{-2}$ м. Сочленение двигателя с приводом — через эластичную муфту. Диаметр по центрам пальцев муфты $D_1 = 28,5 \cdot 10^{-2}$ м. Размеры вала приведены на рис. 11.15.

Находим

$$G_{\text{р}} = 9,81 \cdot 753 = 7387 \text{ Н};$$

по (11.17)

$$F_{\text{п}} = 0,3 \frac{3190}{0,5 \cdot 28,5 \cdot 10^{-2}} = 6715 \text{ Н}.$$

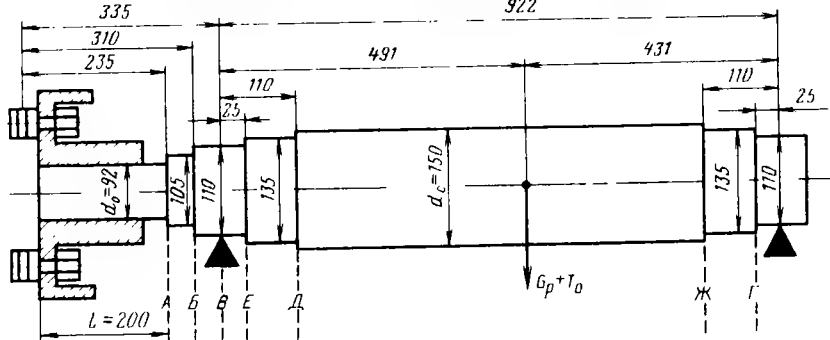


Рис. 11.15. Вал асинхронного двигателя

Прогиб вала посредине магнитопровода под давлением силы тяжести ротора по (11.15)

$$f_G = \frac{7387}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 92,2^2 \cdot 10^{-4}} (47,95 \cdot 10^2 \cdot 43,1^2 \cdot 10^{-4} + 32,53 \cdot 10^2 \cdot 49,1^2 \cdot 10^{-4}) = 0,0012749 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$S_b = 47,95 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1} \text{ и } S_a = 32,53 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$$

(взяты из табл. 11.3).

Прогиб вала посредине магнитопровода ротора от поперечной силы муфты по (11.19)

$$f_{\Pi} = \frac{6715 \cdot 33,5 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 92,2^2 \cdot 10^{-4}} \left[\left(\frac{3}{2} \cdot 92,2 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^4 - 47,95 \cdot 10^2 \right) \cdot 43,1 \cdot 10^{-2} + 32,53 \cdot 10^2 \cdot 49,1 \cdot 10^{-2} \right] = 0,00235 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Первоначальное смещение ротора по (11.20)

$$e_0 = 0,1 \cdot 0,08 \cdot 10^{-2} + 0,0012749 \cdot 10^{-2} + 0,00235 \cdot 10^{-2} = 0,011625 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения по (9.21)

$$T_0 = 2,94 \cdot 55 \cdot 10^{-2} \cdot 36,5 \cdot 10^{-2} \frac{0,011625 \cdot 10^{-2}}{0,08 \cdot 10^{-2}} \cdot 10^5 = 8576,4 \text{ Н.}$$

Прогиб от силы T_0 по (11.22)

$$f_T = 0,0012749 \cdot 10^{-2} \frac{8576,4}{7387} = 0,00148 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения по (11.23)

$$f_M = \frac{0,00148 \cdot 10^{-2}}{1 - 0,127} = 0,001695 \cdot 10^{-2} \text{ м;}$$

$$m = \frac{0,00148}{0,011625} = 0,127.$$

Суммарный прогиб посередине магнитопровода ротора

$$f = (0,001695 + 0,0012749 + 0,00235) \cdot 10^{-2} = 0,00532 \cdot 10^{-2} \text{ м;}$$

т.е. составляет 6,65 % δ , что допустимо.

Критическая частота вращения по (11.25)

$$n_{кр} = 30 \sqrt{\frac{1 - 0,127}{0,0012749 \cdot 10^{-2}}} = 7850 \text{ об/мин} > 1,3 n_{ном}.$$

В расчете на прочность принимаем коэффициент перегрузки $k = 2$.

Напряжение на свободном конце вала в сечении А (рис. 11.15);

по (11.32)

$$M_{иА} = 2 \cdot 6715 \cdot 23,5 \cdot 10^{-2} = 3156 \text{ Н} \cdot \text{м;}$$

по (11.30)

$$W_A = 0,1 \cdot 9,2^3 \cdot 10^{-6} = 77,87 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

по (11.29)

$$\sigma_{прА} = \frac{\sqrt{3156^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 3190)^2}}{77,87 \cdot 10^{-6}} = 635,7 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Напряжение в сечении В:

$$M_{иВ} = 2 \cdot 6715 \cdot 31 \cdot 10^{-2} = 4163 \text{ Н} \cdot \text{м;}$$

$$W_B = 0,1 \cdot 10,5^3 \cdot 10^{-6} = 115,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\sigma_{прВ} = \frac{\sqrt{4163^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 3190)^2}}{115,8 \cdot 10^{-6}} = 488 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Напряжение в сечении Е:

из (11.32) и (11.34)

$$M_{иЕ} = 2 \cdot 6715 \cdot 33,5 \cdot 10^{-2} \left(1 - \frac{2,5 \cdot 10^{-2}}{92,2 \cdot 10^{-2}} \right) + (7387 + 9824,05) \times \\ \times 43,1 \cdot 10^{-2} \frac{2,5 \cdot 10^{-2}}{92,2 \cdot 10^{-2}} = 4560 \text{ Н} \cdot \text{м;}$$

$$T = 8576,4 / (1 - 0,127) = 9824,05 \text{ Н;}$$

$$W_E = 0,1 \cdot 11^3 \cdot 10^{-6} = 133 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

по (11.29)

$$\sigma_{\text{пр}E} = \frac{\sqrt{4560^2 + (0,6 \cdot 2 \cdot 3190)^2}}{133 \cdot 10^{-6}} = 447 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Напряжение в сечении Д

$$M_{иД} = 2 \cdot 6715 \cdot 33,5 \cdot 10^{-2} \left(1 - \frac{11 \cdot 10^{-2}}{92,2 \cdot 10^{-2}} \right) + (7387 + 9824,05) \times \\ \times 43,1 \cdot 10^{-2} \frac{11 \cdot 10^{-2}}{92,2 \cdot 10^{-2}} = 4846 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$W_D = 0,1 \cdot 13,5 \cdot 10^{-6} = 246 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\sigma_{\text{пр}Д} = \frac{\sqrt{4846^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 3190)^2}}{246 \cdot 10^{-6}} = 252 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Напряжение в сечении Г

$$M_{иГ} = [2 \cdot 6715 \cdot 33,5 \cdot 10^{-2} + (7387 + 9824,05) 49,1 \cdot 10^{-2}] \times \\ \times \frac{2,5 \cdot 10^{-2}}{92,2 \cdot 10^{-2}} = 351 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$W_G = 0,1 \cdot 11^3 \cdot 10^{-6} = 133 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\sigma_{\text{пр}Г} = \frac{\sqrt{351^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 3190)^2}}{133 \cdot 10^{-6}} = 287 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Напряжение в сечении Ж

$$M_{иЖ} = [2 \cdot 6715 \cdot 33,5 \cdot 10^{-2} + (7387 + 9824,05) 49,1 \cdot 10^{-2}] \times \\ \times \frac{11 \cdot 10^{-2}}{92,2 \cdot 10^{-2}} = 1545 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$W_{Ж} = 0,1 \cdot 13,5^3 \cdot 10^{-6} = 246 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\sigma_{\text{пр}Ж} = \frac{\sqrt{1545^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 3190)^2}}{246 \cdot 10^{-6}} = 174,8 \text{ Па.}$$

Из сопоставления полученных данных следует, что наиболее нагруженным является сечение А, для которого

$$\sigma_{\text{пр}} = 635,7 \cdot 10^5 < 0,7 \cdot 3600 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

11.4. ПОДШИПНИКИ. ПОДШИПНИКОВЫЕ ШИТЫ

В электрических машинах с горизонтальным валом подшипники выполняют роль поддерживающих опор. Они воспринимают действия силы тяжести ротора, силы одностороннего притяжения, сил, возникающих от несбалансированности ротора и дополнительных продольных нагрузок от приводных механизмов. В машинах относительно небольшой мощности подшипники размещают в подшипниковых щитах, которые располагаются по торцам машины и предназначаются для прикрытия лобовых частей обмоток.

Подшипниковые щиты выполняют сварными и литыми (рис. 11.16), в средней части щитов выполняют сквозное цилиндрическое отверстие для подшипников. Щиты приболчивают к корпусу. Для центровки относительно станины в верхней торцевой части щита делают кольцевой буртик. Если буртик подшипникового щита входит в расточку корпуса, то такое сочленение образует внутренний замок. При расположении буртика на наружной поверхности станины замок называется наружным.

В машинах защищенного исполнения в щитах выполняют окна для прохождения охлаждающего воздуха. Если подшипниковый щит охватывает коллектор или контактные кольца, то для доступа к щеткам в верхней его части делают проемы, закрываемые крышками. Для закрепления щита в станке при его обработке на нем делают специальные технологические приливы.

В машинах большой мощности при внешних диаметрах более 1 м подшипники выносят за корпус и устанавливают на специальных стояках (рис. 11.17). Стояковые подшипники крепят болтами к той же фундаментной плите, на которой установлен корпус. Во избежание появления подшипниковых токов один из стояков изолируют от фундаментной плиты изоляционной прокладкой, при этом с помощью изоляционных трубок и шайб изолируют также крепящие болты и штифты.

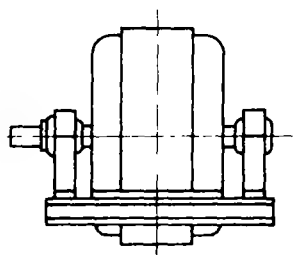
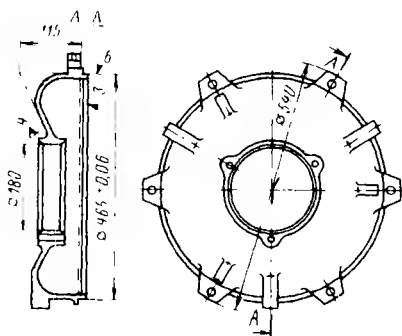


Рис. 11.17. Общий вид машины со стояковыми подшипниками

Рис. 11.16. Подшипниковый щит асинхронного двигателя

Подшипниковые токи, которые замыкаются по контуру вал — стояк подшипника — фундаментная плита — стояк подшипника — вал, приводят к коррозии поверхности подшипников, шеек вала и вызывают старение масла. Причиной появления этих токов является ЭДС, наводимая в вале от сцепленного с ним изменяющегося во времени потока, вызванного магнитной несимметрией из-за наличия стыков между частями статора и сегментами, наличием шпоночных канавок, эксцентричным положением ротора и т. д. Появление подшипниковых токов наблюдается главным образом у машин относительно больших мощностей.

Подшипники по конструктивным признакам подразделяют на подшипники качения (роликовые и шариковые подшипники) и подшипники скольжения. По роду воспринимаемой нагрузки различают опорные подшипники с радиальной нагрузкой и упорные подшипники с аксиальной нагрузкой, а по функциональным признакам — несущие и направляющие подшипники.

Подшипники качения. В машинах с горизонтальным расположением вала, в основном, применяют радиальные однорядные шарико- и роликоподшипники. Радиальные шарикоподшипники (рис. 11.18) могут кроме радиальной нагрузки воспринимать некоторую осевую нагрузку. При повышенном радиальном зазоре между шариками и дорожками качения колец подшипник приобретает свойства радиально-упорного подшипника и хорошо работает на восприятие больших осевых нагрузок. Поэтому в некоторых случаях (особенно в малых машинах) такие подшипники могут быть установлены в машинах с вертикальным расположением вала.

Роликоподшипники (рис. 11.19) применяют для больших нагрузок, чем это допустимо для шарикоподшипников. Подшипники, показанные на рис. 11.19, *а* и *б*, могут воспринимать только радиальную нагрузку, а подшипник на рис. 11.19, *в* кроме радиальной нагрузки может воспринимать небольшую осевую нагрузку в одном направлении. В машинах небольшой мощности при $h \leq 200$ мм чаще всего оба подшипника выбираются шариковыми. У машин средней и большой мощности подшипник со стороны привода, воспринимающий большую нагрузку, выбирается роликовым, а с противоположной стороны — шариковым.

От осевого перемещения на посадочных местах под действием осевой нагрузки кольца подшипников удерживаются при помощи различных элементов — выступа и гайки или специальной упорной пластинки, закрепляющейся на болтах в торце вала, или посаживаемым на вал кольцом. В машинах небольшой мощности обычно не делают фиксации внутреннего кольца шарикоподшипника на валу, а закрепляют лишь наружное его кольцо подшипниковой крышкой, являющейся одновременно деталью, удерживающей смазку подшипника. Если в машине применяются оба шариковых подшипника, то для возможности

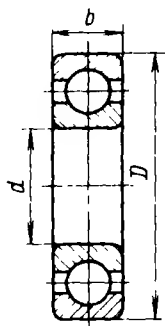


Рис. 11.18. Шарикоподшипник

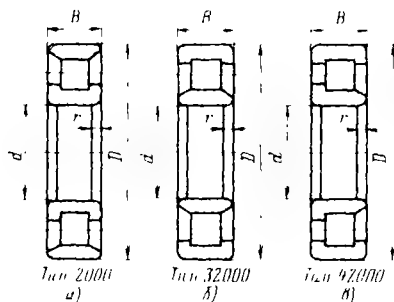


Рис. 11.19. Роликоподшипник

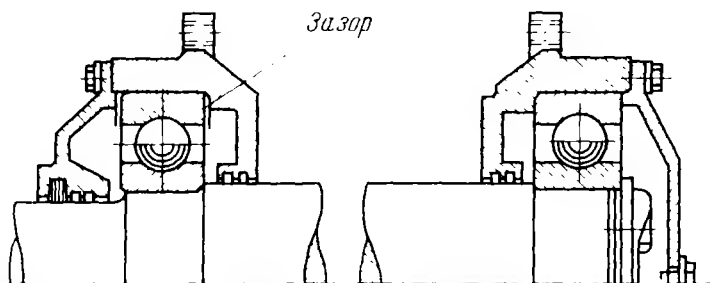


Рис. 11.20. Подшипниковые узлы с шарикоподшипниками

перемещения подшипника в осевом направлении при расширении вала у одного из них, а иногда и у обоих, следует предусмотреть зазоры между крышками и наружным кольцом (рис. 11.20).

Подшипники катящегося трения смазываются преимущественно консистентными смазками. Смазка служит для обеспечения коррозионной стойкости подшипников, распределения и отвода тепла, снижения потерь энергии за счет предотвращения сухого трения, уменьшения шума, защиты от попадания грязи. Рабочее пространство подшипникового узла заполняется смазкой не более чем на 2/3 объема. Выбор консистентной смазки производится на основании данных об условиях работы подшипников.

Для нормальной работы подшипников необходимо предусмотреть уплотнения подшипниковых узлов, защищающих их от пыли, грязи, а также препятствующих вытеканию смазки в полость машины. Применяются различные конструкции уплотнений: фетровые, кольцевые зазоры, манжетные, лабиринтные и др. На рис. 11.21 показаны некоторые из таких конструкций

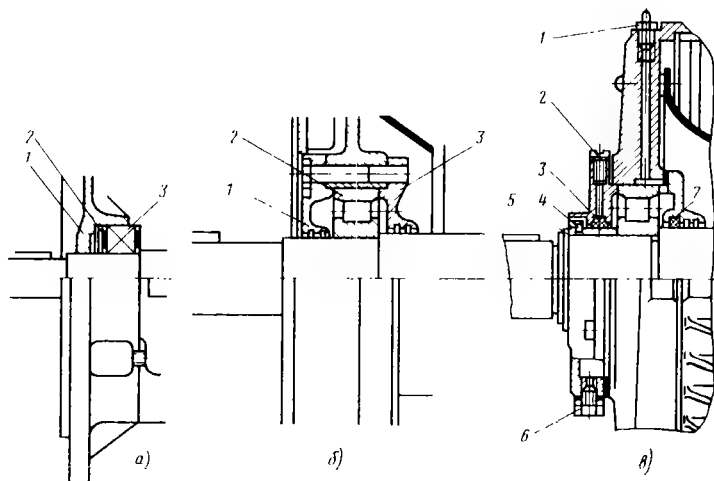


Рис. 11.21. Подшипниковые узлы асинхронных двигателей серии 4А:

а – двигателя 4А112 с герметизированными подшипниками (1 – подшипниковый щит; 2 – пружинное кольцо; 3 – герметизированный подшипник); *б* – двигателя 4АН180, смазка которого пополняется при разборке (1 – наружная крышка подшипника; 2 – подшипник; 3 – внутренняя крышка подшипника); *в* – двигателя 4А200 с устройством для пополнения смазки (1 – масленка; 2 – пробка; 3 – войлочное уплотнение наружной крышки подшипника; 4 – кольцо уплотнения; 5 – стопорное кольцо; 6 – пробка спускного канала; 7 – войлочное уплотнение внутренней крышки подшипника)

При больших частотах вращения (когда $dn > 300$, где n – частота вращения, об/мин, d – диаметр вала, м) для смазки подшипников применяют минеральные масла.

При проектировании машины перед конструктором ставится задача выбора по каталогу типа подшипника, соответствующего нагрузке и условиям их работы.

Для подбора конструкции, типа и размера подшипника необходимо знать: 1) значение и направление действующих на подшипник нагрузок; 2) характер нагрузки (спокойная, ударная, переменная); 3) диаметр цапфы, на которую сажается подшипник; 4) частоту вращения машины; 5) желательный срок службы подшипника.

В общем случае на подшипник действуют радиальная и осевая нагрузки. Выбор подшипника производится по приведенной динамической нагрузке Q . Для однорядных радиальных шарикоподшипников эта нагрузка, Н, определяется по формулам

$$Q = K_H R \text{ при } A/R \leq e \quad (11.35a)$$

$$Q = K_H (0,56R + YA) \text{ при } A/R > e. \quad (11.35б)$$

Таблица 11.4

A/C_0	e	Y	A/C_0	e	Y
0,014	0,19	2,3	0,17	0,34	1,31
0,028	0,22	1,99	0,28	0,38	1,15
0,056	0,26	1,71	0,42	0,42	1,04
0,084	0,28	1,55	0,56	0,44	1
0,11	0,3	1,45			

Приведенная динамическая нагрузка для радиальных роликоподшипников с короткими цилиндрическими роликами находится по (11.35а). В (11.35) приняты следующие обозначения: A , R – осевая и радиальная нагрузки на подшипник, Н; K_H – коэффициент, учитывающий характер нагрузки двигателя: при постоянной спокойной нагрузке $K_H = 1$, при нагрузке с умеренными толчками $K_H = 1,5$, при нагрузке со значительными толчками $K_H = 2$, при нагрузке с ударами и частыми сильными толчками $K_H = 3$; для машин общего назначения в большинстве случаев можно принять $K_H = 1,5 \div 2$; Y – коэффициент приведения осевой нагрузки к радиальной. Значения Y и e для однорядных радиальных шарикоподшипников в зависимости от отношения A/C_0 (C_0 – статическая грузоподъемность, Н, см. табл. П5.5), определяют по табл. 11.4.

Для промежуточных значений A/C_0 применяют линейную интерполяцию. Для электрических машин с горизонтальным расположением вала в большинстве случаев можно не учитывать осевую нагрузку ($A \approx 0$). При вертикальном расположении вала осевая нагрузка равна, Н:

$$A = G_p + G_{шк} + 0,1R,$$

где G_p , $G_{шк}$ – силы тяжести ротора (или якоря с коллектором) и шкива (или полумуфты); $0,1R$ – осевое магнитное притяжение.

При определении радиальной нагрузки на подшипники R_A и R_B исходят из наихудшего случая. Для нахождения R_B при односторонней передаче предполагается, что сила F_n направлена вниз, а для R_A – вверх, тогда (рис. 11.22)

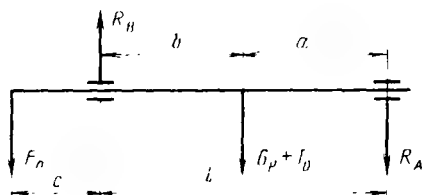


Рис. 11.22. К определению радиальных реакций подшипников

$$R_B = F_n \frac{l+c}{l} + (G_p + T_0) \frac{a}{l}; \quad (11.36)$$

$$R_A = F_n \frac{c}{l} + (G_p + T_0) \frac{b}{l}, \quad (11.37)$$

где F_n определяется для работы машины в номинальном режиме, Н; G_p — сила тяжести ротора, Н; T_0 — сила одностороннего магнитного притяжения, Н (см. § 11.3).

Определяя приведенную нагрузку Q , а также учитывая частоту вращения подшипника n и требуемый срок службы L_d , находят динамическую грузоподъемность C , Н, которая является основной характеристикой подшипника:

для шарикоподшипников

$$C = \frac{Q}{25,6} \sqrt[3]{L_d n}; \quad (11.38)$$

для роликоподшипников

$$C = \frac{Q}{18,5} (L_d n)^{0,3}. \quad (11.38a)$$

Срок службы (или долговечность) подшипника может быть задан или его выбирают равным $L_d \geq (15 \div 20) \cdot 10^3$ ч.

По найденной динамической грузоподъемности по таблицам ГОСТ (см. табл. П5.1 и П5.2) выбирают конкретный подшипник и находят его габаритные размеры. Диаметр внутреннего кольца у выбранного подшипника должен быть равен диаметру цапфы. Наряду с динамической грузоподъемностью в таблицах приведены данные о предельной частоте вращения. Расчетное значение C должно быть меньшим или равным табличному значению. Если расчетное значение C получается больше табличного, а долговечность не может быть уменьшена, то следует выбрать подшипник из другой, соответствующей заданным параметрам серии. В некоторых случаях можно пойти на установку сдвоенных подшипников. При применении сдвоенных подшипников, учитывая неравномерность распределения между ними нагрузки, каждый подшипник следует рассчитывать на нагрузку, равную 70% всей нагрузки опоры. Подбор подшипников рекомендуется производить, начиная с легкой серии.

Подшипники скольжения. В настоящее время подшипники скольжения применяют главным образом для крупных электрических машин и выполняют в виде стояковых подшипников (рис. 11.23). Корпус подшипника изготавливается из чугуна. В корпус входят стояк 1 и верхняя крышка 2. Основным элементом подшипника явля-

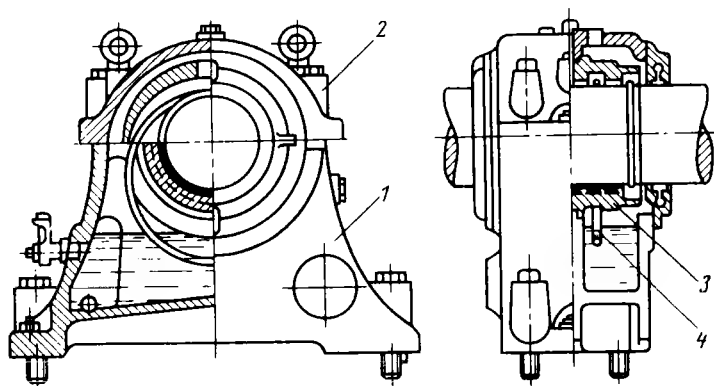


Рис. 11.23. Стояковый подшипник с кольцевой смазкой

ется вкладыш 3 — втулка, разрезанная по образующей на две половины. В его верхней половине выполняются одно или два отверстия для смазочных колец 4. Вкладыши изготавливаются из стали, чугуна, бронзы и других материалов. Толщина вкладышей принимается равной $s = (0,05d + 5 \text{ мм}) \div (0,1d + 0,5 \text{ мм})$, где d — диаметр цапфы. Внутренняя поверхность вкладыша, охватывающая цапфу вала, заливается антифрикционным белым сплавом — баббитом. Для улучшения связи между баббитом и вкладышем последний имеет кольцевые канавки в виде ласточкина хвоста. Толщина слоя заливки в зависимости от диаметра вкладыша равна 2—8 мм. Посадка вкладышей в корпус подшипников выполняется жесткой или самоустанавливающейся (рис. 11.24). При жесткой посадке вкладыш фиксируется в гнезде, при самоустанавливающейся он опирается на шаровые опоры и может занимать положение в своих гнездах соответственно прогибу или перекосу вала.

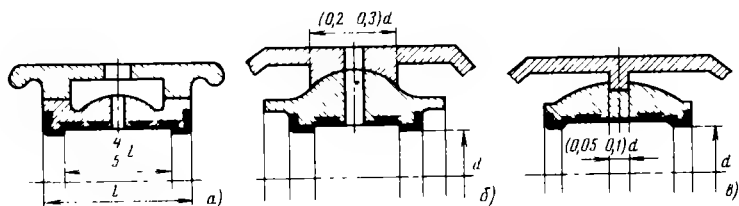


Рис. 11.24. Посадки вкладышей в корпусе подшипника:

а — жесткая; б — сферическая; в — узкоцилиндрическая

Таблица 11.5. Допускаемые нагрузки на подшипники с кольцевой смазкой, кН

Размеры, мм	Частота вращения, об/мин													
	125	150	167	187	214	250	300	375	428	500	600	750	1000	1500
100 × 130	—	—	—	—	—	—	—	—	9	10	11	12	14	16
110 × 130	—	—	—	—	—	—	—	10	11	12	13	14	16	19
120 × 140	—	—	—	—	—	—	—	12,5	13,5	14,5	15,5	17	20	24
130 × 140	—	—	—	—	—	—	13	14	15	16	17,5	19	22,5	26
140 × 150	—	—	—	—	—	—	14,5	16,5	17,5	18,5	20,5	22,5	26	30
150 × 150	—	—	—	—	—	—	16	18	19	20,5	22,5	24	28	32,5
160 × 160	—	—	—	—	—	—	18,5	20,5	22	23,5	25,5	28	32	—
180 × 180	—	—	—	—	—	22	24,5	27	29	31	33,5	37	42	—
200 × 200	—	—	—	—	26,5	29	31,5	34,5	36,5	39	42	47	53	—
220 × 220	—	—	—	31,5	33,5	36,5	39,5	43	46	48,5	54	59	66	—
250 × 250	—	—	32,5	44	46,5	49,5	53,5	58	61	66	72	79	—	—
280 × 280	—	53,5	55,5	58	61	66	71,5	77,5	82	87,5	94	104	—	—
300 × 300	—	63	66	69	73	78	84,5	91	97	103	111	122,5	—	—
350 × 350	85	91	95,5	100	105	114	122	134	140	150	160	—	—	—
400 × 400	115	125	130	136	144	155	166	182	190	208	224	—	—	—
450 × 450	155	165	173	180	190	205	220	241	256	273	—	—	—	—
500 × 500	200	205	223	232	246	265	290	320	340	—	—	—	—	—

Для смазки трущихся поверхностей применяют масло. Способ подачи смазки выбирают в зависимости от условий работы машины. Наиболее распространенным способом смазки является кольцевая. Для этого на цапфу надевают металлическое кольцо большего диаметра. Кольцо свободно висит на цапфе, погружаясь в масляный резервуар подшипника. При вращении цапфы кольцо также начинает вращаться и, проходя через масляный резервуар, подает масло на верхнюю часть цапфы, где оно растекается по всей поверхности. Для контроля уровня масла в ванне подшипника имеется маслоуказатель, который снабжают смотровым стеклом. Кольцевая смазка применяется при окружных скоростях цапф $v_{ц} = 2 \div 10$ м/с. При скоростях $v_{ц} > 10$ м/с применяют принудительную смазку. В этом случае в пространство между трущимися поверхностями подается извне под давлением масло, которое затем стекает в масляную ванну и по спускной трубе идет в холодильник, а затем снова к насосу. При такой смазке в подшипник поступает такое количество масла, которое необходимо для смазки и охлаждения подшипника. Масло подают под давлением $(0,25 - 1) \cdot 10^5$ Па. Находит применение также комбинированная система смазки, когда при принудительной смазке применяются маслоподающие кольца.

Для предотвращения попадания масла в машину и вытекания его из подшипника в месте выхода из стояка помещают лабиринтные уплотнения и маслоулавливающие кольца.

Отдельные элементы подшипников скольжения стандартизированы.

Выбор подшипника скольжения производят по табл. 11.5, исходя из нагрузки на подшипник, которую определяют по (11.36) или (11.37). Указанные в таблице размеры вкладыша подшипника означают его внутренний диаметр и длину. В таблице приведена ступенчатая линия, которая разграничивает подшипники с кольцевой смазкой (выше линии) и подшипники, требующие принудительной смазки.

Пример. Выбрать подшипники качения для асинхронного двигателя, имеющего следующие данные: $n_{ном} = 585$ об/мин (см. пример расчета в § 11.3), $G_p = 7387$ Н, $T_0 = 8576,4$ Н, $F_{п} = 6715$ Н, $b = 49,1 \cdot 10^{-2}$ м, $a = 43,1 \cdot 10^{-2}$ м, $c = 33,5 \cdot 10^{-2}$ м, $l = 92,2 \cdot 10^{-2}$ м. Диаметр цапфы $11 \cdot 10^{-2}$ м.

Из (9.37)

$$R_A = 6715 \frac{33,5}{92,2} + (7387 + 8576,4) \frac{49,1}{92,2} = 10\,940,95 \text{ Н};$$

из (9.35а)

$$Q_A = 1,5 \cdot 10\,940,95 = 16\,411 \text{ Н};$$

из (11.38)

$$C = \frac{16\,411}{25,6} \sqrt[3]{15\,000 \cdot 585} = 132\,057 \text{ Н}.$$

При диаметре цапфы 110 мм выбираем шарикоподшипник средней серии 322 ($C = 158\,000\text{ Н}$).

Аналогично

$$R_B = 6715 \frac{33,5 + 92,2}{92,2} + (7387 + 8576,4) \frac{43,1}{92,2} = 16\,617\text{ Н};$$

$$Q_B = 1,5 \cdot 16\,617 = 24\,925,5\text{ Н};$$

$$C = \frac{24\,925,5}{18,5} (15\,000 \cdot 585)^{0,3} = 166\,200\text{ Н}.$$

При диаметре цапфы 110 мм выбираем радиальный роликоподшипник легкой узкой серии 32222 ($C = 185\,000\text{ Н}$).

11.5. ПОЛЮСЫ

На полюсах электрических машин располагается обмотка возбуждения, которая создает магнитный поток. Необходимый характер распределения этого потока в воздушном зазоре обеспечивается соответствующей конфигурацией полюсного наконечника. Как правило, полюсы машин постоянного тока размещаются на статоре, а у синхронных машин – на роторе. В машинах постоянного тока кроме главных полюсов на статоре размещаются добавочные, предназначенные для улучшения коммутации.

Главные полюсы машин постоянного тока (рис. 11.25) собирают из отдельных листов, которые штампуют из электротехнической стали толщиной 1 мм. Собранные в пакет, они спрессовываются при давлении $(20 - 25) \cdot 10^5\text{ Па}$ и скрепляются заклепками. Крайние листы пакета выполняются более толстыми. В зависимости от размера полюса они штампуются из листовой стали толщиной 4–10 мм. Эти листы по размеру делаются несколько меньшими, чем остальные.

Заклепки вставляются в предусмотренные в листах отверстия, а затем развальцовываются в конических углублениях листов (рис. 11.25). Они равномерно распределяются по поверхности листов и занимают около 0,02–0,03 этой поверхности. Обычно их не менее четырех. Диаметры отверстий под заклепки принимаются на 0,15–0,2 мм больше диаметра самой заклепки. Для полюсов применяются заклепки диаметром 6, 8, 10 и 12 мм.

Полюсы прикрепляются к станине болтами. Для этого в теле шихтованного полюса высверливаются отверстия и нарезается резьба (рис. 11.26, а). Резьба в шихтованном теле полюса механически ненадежна и не всегда обеспечивает плотное прилегание полюса к станине. Поэтому в более крупных машинах, а также у машин, работающих в условиях тряски, болты вворачиваются в стержни, вставляемые в тело полюса (рис. 11.26, б).

Рис. 11.25. Главный полюс машины постоянного тока

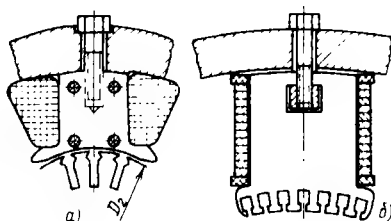
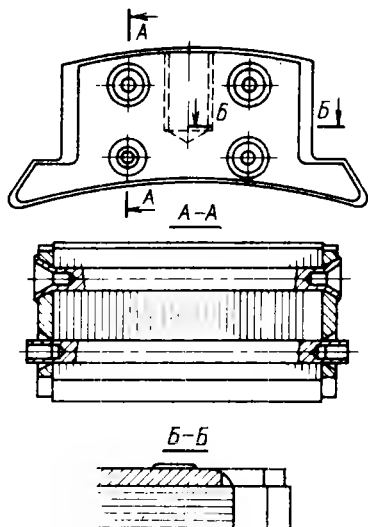


Рис. 11.26. Крепление главного полюса к станине

В крупных машинах постоянного тока в полюсных наконечниках выштамповываются пазы для размещения компенсационной обмотки (рис. 11.26, б).

Добавочные полюсы выполняются цельными или собранными из штампованных стальных листов. В машинах относительно небольшой мощности добавочные полюсы выполняются в виде стальных отливок или из полос проката. В настоящее время они часто собираются из листового стали толщиной 1 мм. На рис. 11.27 даны различные исполнения добавочных полюсов. Сердечник полюса и его наконечник (рис. 11.27, а) выполняются из одной заготовки путем ее последующей обработки. Полочки (рис. 11.27, б и в), служащие для поддержания катушек, выполняются из немагнитных материалов и прикрепляются заклепками к телу полюса. В машинах относительно большой мощности полюсы выполняются Т-образной формы (рис. 11.27, в). При таком их выполнении увеличивается поверхность прилегания полюса к станине и уменьшается индукция в стыке. Полюсы, собран-

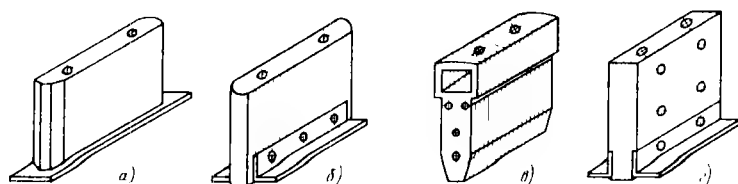


Рис. 11.27. Добавочные полюсы машины постоянного тока

ные из отдельных листов, имеют преимущество перед массивными, так как в них уменьшается замедляющее действие вихревых токов при переходных процессах, что способствует улучшению коммутации.

При механическом расчете полюсов проверяется их крепление к станине и проводится расчет заклепок.

Расчет крепления главных полюсов в машинах постоянного тока проводится из условия, что на болты, которыми полюс соединяется со станиной, действует тангенциальная сила Q от вращающего момента, а на полюсы, расположенные по горизонтальному диаметру ярма, — еще и сила тяжести полюса с обмоткой $G_{п.о}$ (рис. 11.28). Магнитное притяжение полюса якорем в этих расчетах не учитывается, так как он одновременно притягивается и станиной, причем с большей силой вследствие более высокого значения индукции в сердечнике полюса.

Тангенциальная сила, действующая на полюс, Н,

$$Q = kM_{ном}/(pD_2), \quad (11.39)$$

где k — коэффициент перегрузки ($k = 2 \div 3$); p — число пар полюсов; D_2 — диаметр якоря, м; $M_{ном}$ — номинальный момент, Н · м; $M_{ном} = 9550P_{ном}/n_{ном}$.

Сила тяжести полюса с обмоткой, Н,

$$G_{п.о} = 9,81m_{п.о};$$

здесь $m_{п.о}$ — масса полюса с обмоткой, кг.

Принимая коэффициент трения между станиной и полюсом равным 0,2, определяют необходимую площадь сечения болтов полюса по внутреннему диаметру резьбы, м²:

$$S_б = (Q + G_{п.о})/(0,2 \sigma), \quad (11.40)$$

где σ — допустимое напряжение растяжения в болтах; для стали марки Ст3 с некоторым запасом $\sigma = 60$ МПа.

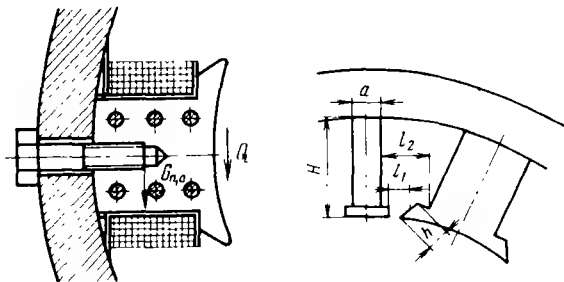


Рис. 11.28. К расчету крепления главного полюса

Рис. 11.29. К расчету крепления добавочного полюса

Размер болта по внутреннему диаметру резьбы, м, при числе болтов на полюс m_6 ($m_6 \geq 2$)

$$d_{01} = \sqrt{4S_6 / (\pi m_6)}. \quad (11.41)$$

Заклепки полюсов проверяются на растяжение:

$$\sigma = \frac{4qS_n}{\pi d_3^2 m_3} \leq 600 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad (11.42)$$

где q — давление спрессованных листов полюса: $q = (20 \div 25) \cdot 10^5$ Па; S_n — площадь вырубки листа полюса, м²; m_3 и d_3 — число и диаметр, м, заклепок ($m_3 \geq 4$).

Расчет крепления добавочных полюсов производится, исходя из того, что на болты, притягивающие их к станине, действует усилие магнитного притяжения к соседним разноименным главным полюсам. В передаче вращающего момента добавочные полюсы не участвуют. Учитывая, что основание добавочного полюса значительно уже, чем у главного, необходимо проверить полюс не только на сдвиг, но и на опрокидывание.

Силу взаимодействия между добавочным полюсом и главными полюсами, расположенными по обе стороны от него, различны по значению и направлению. Результирующая сила взаимодействия между концами добавочного полюса и полюсным наконечником соседнего главного полюса равна, Н:

$$Q_1 = h l_d \frac{(F_{ш} + k F_c) k F_d}{4,08 \cdot 10^5 l_1^2}. \quad (11.43)$$

Результирующая сила взаимодействия между сердечником добавочного полюса и сердечниками соседних главных полюсов, Н,

$$Q_2 = (H - h) l_d \frac{(F_{ш} + k F_c) k F_d}{18,3 \cdot 10^5 l_2^2}. \quad (11.44)$$

В приведенных формулах обозначения величин соответствуют обозначениям на рис. 11.29, l_d — осевая длина добавочного полюса. Магнитодвижущие силы параллельной обмотки возбуждения $F_{ш}$, последовательной обмотки F_c и добавочных полюсов F_d принимаются для номинального режима из электромагнитного расчета; k — коэффициент перегрузки.

Полюс, расположенный по горизонтальному диаметру ярма, находится в наихудших условиях, поскольку действующие силы тяжести и магнитного тяжения суммируются. Для этого полюса расчетное натяжение болтов, при котором сила трения между станиной и полюсом обеспечивает отсутствие сдвига полюса, равно, Н:

$$P' = (Q_1 + Q_2 + G_{\text{д.п}})/0,2, \quad (11.45)$$

где $G_{\text{д.п}}$ – сила тяжести добавочного полюса с обмоткой, Н; 0,2 – коэффициент трения между станиной и полюсом.

Расчетное натяжение болтов, которое обеспечивает отсутствие опрокидывания полюса, Н,

$$P'' = \frac{H}{0,5a} (0,9Q_1 + 0,7Q_2 + 0,5G_{\text{д.п}}). \quad (11.46)$$

Расчет болтов ведется по наибольшему натяжению P' или P'' .

Внутренний диаметр резьбы болта, м,

$$d_{02} = \sqrt{4p/(\pi m_{\text{д}})}, \quad (11.47)$$

где $m_{\text{д}}$ – число болтов: $m_{\text{д}} \geq 2$.

В целях унификации болты для крепления главных и добавочных полюсов при небольшой разнице в их диаметрах принимают одинаковыми.

Пример. Исходные данные: $P_{\text{ном}} = 150$ кВт, $n_{\text{ном}} = 1450$ об/мин, $D_2 = 36,8 \times 10^{-2}$ м, $l = l_{\text{д}} = 25,5 \cdot 10^{-2}$ м, $F_{\text{д}} = 6000$ А, $F_{\text{с}} = 2000$ А, $F_{\text{ш}} = 7400$ А, $m_{\text{д.п}} = 22$ кг, $m_{\text{п.о}} = 48$ кг, $l_1 = 4,5 \cdot 10^{-2}$ м, $l_2 = 7,5 \cdot 10^{-2}$ м; $H = 13 \cdot 10^{-2}$ м, $h = 2 \cdot 10^{-2}$ м, $a = 4 \cdot 10^{-2}$ м, $S_{\text{п}} = 182 \cdot 10^{-4}$ м², $m_3 = 6$, $d_3 = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м, $k = 2$, $m_{\text{б}} = 2$, $m_{\text{д}} = 2$.

Расчет болтов главного полюса:
номинальный момент

$$M_{\text{ном}} = 9550 \frac{150}{1450} = 987,9 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

тангенциальная сила по (9.39)

$$Q = 2 \cdot 987,9 / (2 \cdot 36,8 \cdot 10^{-2}) = 2684,5 \text{ Н};$$

сила тяжести полюса с обмоткой

$$G_{\text{п.о}} = 9,81 \cdot 48 = 471 \text{ Н};$$

из (11.40)

$$S_{\text{б}} = (2684,5 + 471) / (0,2 \cdot 600 \cdot 10^5) = 26,29 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2;$$

внутренний диаметр болта

$$d_{01} = \sqrt{\frac{4 \cdot 26,29 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot 2}} = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 13 \text{ мм}.$$

Выбираем болт М16 ($d_{01} = 13,835$ мм).

Проверка заклепок главных полюсов из (11.42):

$$\sigma = \frac{4 \cdot 20 \cdot 10^5 \cdot 182 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 10^{-4} \cdot 6} = 537 \cdot 10^5 < 600 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Расчет болтов добавочного полюса:
из (11.43)

$$Q_1 = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 25,5 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{(7400 + 2 \cdot 2000) 2 \cdot 6000}{4,08 \cdot 10^5 (4,5 \cdot 10^{-2})^2} = 844 \text{ Н;}$$

из (11.44)

$$Q_2 = (13 - 2) \cdot 10^{-2} \cdot 25,5 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{(7400 + 2 \cdot 2000) 2 \cdot 6000}{18,3 \cdot 10^5 (7,5 \cdot 10^{-2})^2} = 373 \text{ Н;}$$

сила тяжести добавочного полюса с обмоткой

$$G_{д.п} = 9,81 \cdot 22 = 216 \text{ Н;}$$

из (11.45)

$$P' = (844 + 373 + 216)/0,2 = 7165 \text{ Н;}$$

из (11.46)

$$P'' = \frac{13 \cdot 10^{-2}}{0,5 \cdot 4 \cdot 10^{-2}} (0,9 \cdot 850 + 0,7 \cdot 373 + 0,5 \cdot 216) = 7371 \text{ Н;}$$

внутренний диаметр резьбы болта

$$d_{02} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7371}{3,14 \cdot 2 \cdot 600 \cdot 10^5}} = 0,89 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 8,9 \text{ мм;}$$

можно выбрать болт М12 ($d_{02} = 10,106 \text{ мм}$); для крепления главных и добавочных полюсов целесообразно выбирать одинаковые болты М16.

Полюсы синхронных машин чаще всего выполняются шихтованными. Листы для полюсов штампуются из электротехнической стали толщиной 0,5–1 мм для машин небольшой мощности (до 100 кВт) и из стали марки Ст3 толщиной 1–2 мм для более мощных машин.

Листы собираются в пакет, по краям которого укладываются концевые щеки. В зависимости от ширины полюса щеки могут иметь различную форму (рис. 11.30). Пакет стягивается шпильками, пропускаемыми через отверстия, предусмотренные в листах сердечника. Гайки утапливаются в тело шек. Количество стяжных шпилек берется не менее четырех. Диаметр шпилек и их число определяются по (11.42) и выбираются таким образом, чтобы напряжение в них не превышало 60 МПа, а усилие, стягивающее сердечник, вызывало давление между листами около 2 МПа.

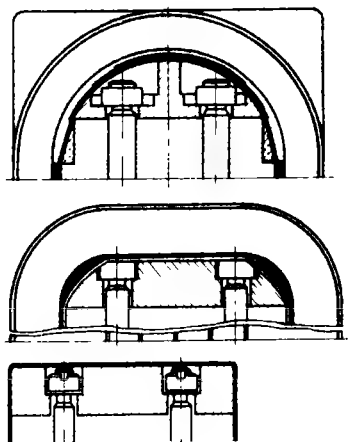


Рис 11.30. Концевые щеки полюсов синхронных машин

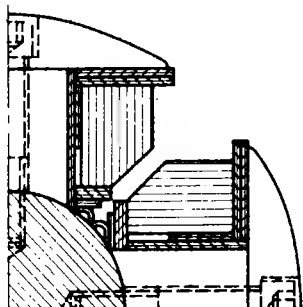


Рис. 11.31. Крепление полюсов синхронных машин небольшой мощности

В машинах небольшой мощности полюсы болтами прикрепляют к валу или к напрессованной в него втулке (рис. 11.31).

Крепление полюсов в синхронных машинах мощностью свыше 100 кВт зависит от размеров ротора и частоты его вращения.

В тихоходных машинах полюсы к ободу магнитного колеса прикрепляются с помощью болтов, которые вворачиваются в стержни, вставленные в тело полюса (рис. 11.32, а). В быстроходных машинах полюсы прикрепляются к остову ротора с помощью хвостов Т-образной формы (рис. 11.32, б), а в некоторых случаях в форме ласточкина хвоста (рис. 11.32, в). Т-образные хвосты более технологичны, поэтому они имеют преимущественное применение, за исключением машин с небольшим диаметром ротора. Размеры Т-образных хвостов и пазов для них нормализованы. В табл. 11.6 в соответствии

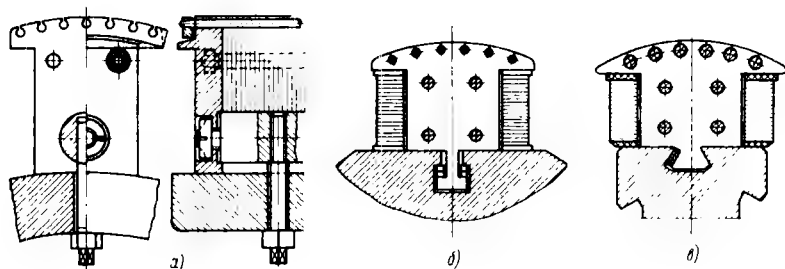


Рис. 11.32. Крепление полюсов синхронной машины большой мощности

Таблица 11.6

№ хвоста	Размеры выступа, мм						Размеры паза, мм					Толщина листа, мм	Допустимая нагрузка, кН/м	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>e</i>	<i>k</i>	<i>r</i>	<i>g</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>n</i>			Хвост не проварен	Хвост проварен
1	12	24	24	12		1	14	26	25	12	0,5 1		440 590	590 980
2	20	40	38	20	-	1,5	22	42	40	20	1 1,5		790 1470	1080 1960
3	26	52	50	25	80	1,5	29	55	52	25	1 1,5		690 2060	1080 2750
4	32	65	58	32	98	1,5	35	69	60	32	1 1,5		610 2160	1280 2850
5	38	70	58	32	110	1,5	42	74	60	32	1 1,5		520 2450	1170 3340

с рис. 11.33 приведены размеры хвостов и нагрузки в них в зависимости от толщины листов. Хвосты в пазах расклиниваются клиньями из шпоночной стали с уклоном 1 : 100. При необходимости полюс может быть выполнен с двумя хвостами, расстояние между которыми обозначено в таблице буквой *k*. При больших нагрузках тонкие листы шихтованного магнитопровода теряют устойчивость и коробятся. Для увеличения механической устойчивости хвоста его кромки иногда провариваются по специально выштампованным лункам.

Расчет крепления полюсов Т-образными хвостами в синхронных машинах производится путем сопоставления нагрузки на хвост с допустимой нагрузкой по табл. 11.6. Нагрузка на хвост обусловлена центробежной силой, которая определяется на единицу длины при максимальной частоте вращения.

Центробежная сила полюса с обмоткой на 1 м длины полюса, Н/м,

$$C' = 11,0(m'_{\text{п}} + m'_{\text{к.в}}) R \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 \cdot 10^3, \quad (11.48)$$

где *R* – средний радиус центра тяжести полюса (рис. 11.34), м:

$$R = H + 0,5h_{\text{mp}}; \quad (11.49)$$

где $m'_{\text{п}}$, $m'_{\text{к.в}}$ – массы полюса и катушки обмотки возбуждения на 1 м длины, кг/м; n_{max} – максимальная частота вращения: для синхронных машин общего назначения $n_{\text{max}} = 1,2n_{\text{ном}}$.

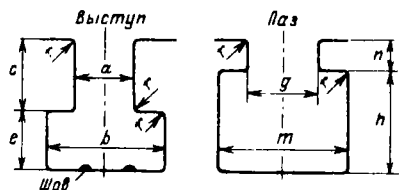


Рис. 11.33. Размеры паза и хвоста Т-образной формы

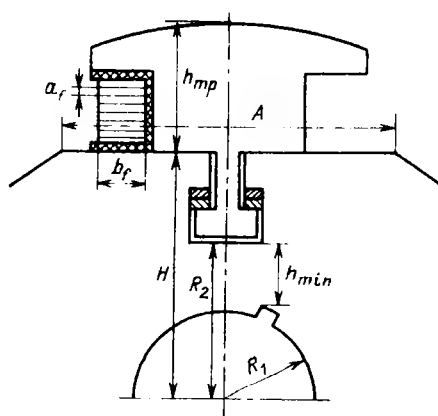


Рис. 11.34. Полус с Т-образным хвостом

Масса катушки обмотки возбуждения на 1 м длины, кг/м,

$$m'_{к.в} = 2a_f b_f w_f \cdot 8900 \cdot 1,05 = 1,87 \cdot 10^4 a_f b_f w_f, \quad (11.50)$$

где $a_f b_f$ — поперечное сечение проводника обмотки возбуждения, м^2 ; w_f — число витков в катушке; коэффициент 1,05 учитывает изоляцию проводника.

Масса полюса на 1 м длины, кг/м,

$$m'_m = 7800 S_m, \quad (11.51)$$

где S_m — площадь поперечного сечения полюса с полюсными наконечником и хвостами, м^2 ; для предварительных расчетов площадь хвостов можно принимать равной 7% площади сердечника.

По найденной из (11.48) силе C' по табл. 11.6 выбирается тип хвоста.

В том случае, если полученная из расчета нагрузка на хвост превышает допустимую, полюс можно выполнять с двумя или большим числом хвостов. При учете возможной неравномерности распределения усилий между хвостами нагрузка на каждый из них по сравнению с табличной снижаются на 10% при двух хвостах и на 20% при трех.

Пример. Исходные данные: $n_{\text{ном}} = 600$ об/мин, $H = 41,9 \cdot 10^{-2}$ м, $h_{mp} = 21,5 \times 10^{-2}$ м, $S_m = 484 \cdot 10^{-4}$ м^2 , $a_f = 0,28 \cdot 10^{-2}$ м, $b_f = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $w_f = 46$, толщина листа 1,5 мм.

Из (11.50)

$$m'_{к.в} = 1,87 \cdot 10^4 \cdot 0,28 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 46 = 72,3 \text{ кг/м};$$

из (11.51)

$$m'_m = 7800 \cdot 484 \cdot 10^{-4} = 377,5 \text{ кг/м};$$

из (11.49)

$$R = \left(41,9 + \frac{1}{2} 21,5 \right) \cdot 10^{-2} = 52,65 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

из (11.48)

$$C' = 11,0 (377,5 + 72,3) 52,65 \cdot 10^{-2} \left(\frac{1,2 \cdot 600}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 1354,6 \text{ Н/м.}$$

По табл. 11.6 для этой машины может быть выбран хвост № 2 без проварки основания.

Расчет крепления полюсов с помощью ласточкиных хвостов. Закрепление полюсов в ободу ротора с помощью выступов в виде ласточкина хвоста (см. рис. 11.32, в) применяют в машинах средней мощности, когда радиальная высота обода ротора может оказаться недостаточной для размещения паза Т-образной формы. Заклинивание хвостов производят двумя затяжными клиньями с уклоном 1 : 200, расположенными с боковой стороны хвоста.

В табл. 11.7 даны размеры нормализованных ласточкиных хвостов и пазов для них (обозначения см. на рис. 11.35).

Выбор хвоста производится так же, как и в предыдущем случае, исходя из рассчитанной по (11.48) нагрузки.

Расчет крепления полюса при помощи болтов. Число болтов для крепления полюса m_6 выбирается не менее двух. Для того чтобы не происходило удлинение болтов под действием центробежной силы при вращении ротора, болты ставят с предварительным натягом, который превышает центробежную силу на 20%.

Центробежная сила полюса при максимальной скорости, Н,

$$C_1 = 11,0 \cdot 10^3 m_{\text{п}} R (n_{\text{max}}/1000)^2, \quad (11.52)$$

где $m_{\text{п}}$ — масса одного полюса, равная сумме масс сердечника, обмотки возбуждения и демпферной (пусковой) обмотки (берется из электромагнитного расчета); R — по (11.49).

Внутренний диаметр резьбы болта, м,

$$d_0 = \sqrt{\frac{1,2 \cdot 4 C_1}{\pi m_6 \sigma_{\text{доп}}}}. \quad (11.53)$$

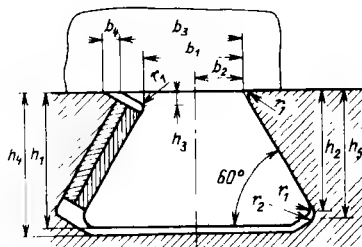


Рис. 11.35. Размеры паза и ласточкина хвоста

Таблица 11.7

№ хво- ста	Размеры хвоста, мм					
	b_1	b_2	h_1	h_2	h_3	r_1
1	14	4,4	21	16,5	4,5	1,5
2	18	6,4	25	20,5	4,5	1,5
3	22	8,4	29	24,5	4,5	2
4	27	10,9	34	29,5	4,5	2,5
5	33	13,9	41	36,5	4,5	3
6	40	17,4	49	44,5	4,5	4

Допустимое напряжение $\sigma_{\text{доп}}$ для болтов из стали марок Ст5 и 30 составляет 120 МПа.

Пример. Исходные данные: $m_{\text{п}} = 106$ кг, $n_{\text{ном}} = 375$ об/мин, $H = 48,6 \cdot 10^{-2}$ м, $h_{\text{тр}} = 18,8 \cdot 10^{-2}$ м.

Из (11.49)

$$R = (48,6 + 0,5 \cdot 18,8) \cdot 10^{-2} = 58 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

по (11.52)

$$C_1 = 11,0 \cdot 10^3 \cdot 106 \cdot 58 \cdot 10^{-2} \left(\frac{1,2 \cdot 375}{1000} \right)^2 = 135\,256 \text{ Н}.$$

Внутренний диаметр болта по (11.53)

$$d_0 = \sqrt{\frac{1,2 \cdot 4 \cdot 135\,256}{3,14 \cdot 2 \cdot 1200 \cdot 10^5}} = 2,94 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 29,4 \text{ мм}.$$

По диаметру $d_0 = 29,4$ мм выбирается ближайший по размеру болт М36 ($d_0 = 31,67$ мм).

Расчет межполюсных распорок. При вращении ротора на проводники обмотки возбуждения действует центробежная сила $G_{\text{п}}$, направленная по радиусу ротора. Эту силу, приложенную к центру тяжести проводника, можно разложить на две составляющие, одна из которых направле-

Размеры паза, мм					Толщина листа, мм	Допустимая нагрузка, кН/м	
b_3	b_4	h_4	h_5	r_2		Хвост не проварен	Хвост проварен
19,2	6,5	22	17,5	1,5	1 1,5	295 785	440 980
23,2	6,5	26,5	22	1 5	1 1,5	390 980	590 1280
27,2	6,5	30,5	26	2	1 1,5	490 1180	735 1570
32,2	6,5	36	31,5	2,5	1,5	1370	1870
38,2	6,5	43,5	39	3	1,5	1770	2350
45,2	6,5	51,5	47	4	1,5	2160	2850

на по продольной оси полюса, а другая — перпендикулярно этой оси (рис. 11.36). Продольная составляющая воспринимается полюсным наконечником, а поперечная составляющая стремится выгнуть проводник в межполюсное пространство. Поперечная составляющая одинакова для всех проводников катушки, т. е. не зависит от положения витка по высоте полюса. Напряжение на изгиб в медном проводнике катушки полюса, Па, определяют по формулам:

а) для катушки с двумя радиусами закругления (рис. 11.36)

$$\sigma_{\text{и}} = 0,49 \frac{2r + l}{2b_f} (2r + L)^2 \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 k \cdot 10^8; \quad (11.54)$$

б) для катушки с одним радиусом закругления

$$\sigma_{\text{и}} = 0,98 \frac{r}{2b_f} (2r + L)^2 \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 k \cdot 10^8. \quad (11.55)$$

Индексы в формулах соответствуют обозначениям на рис. 11.36. Значения r , l , L и b_f подставляются в метрах.

Уменьшение напряжений при увеличении отношения $\mu = r/L$ учитывают коэффициентом k (рис. 11.37).

Если напряжение на изгиб медного проводника, полученное по (11.54) или (11.55), меньше или равно 50 МПа, то межполюсные распорки можно не ставить. Если же $\sigma_{\text{и}} > 50$ МПа, то для укрепления обмотки между катушками следует поставить распорки (рис. 11.38).

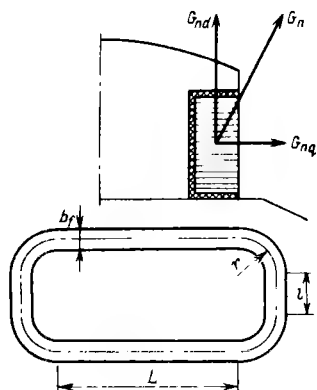


Рис. 11.36. К расчету межполюсных распорок

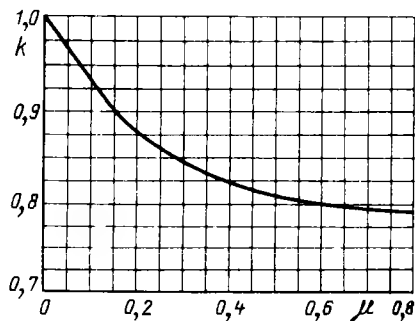


Рис. 11.37. Зависимость $k = f(\mu)$

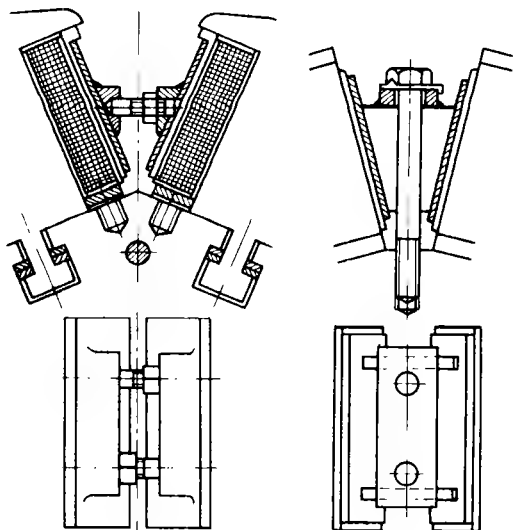


Рис. 11.38. Межполюсные распорки

Их количество по длине машины определяется по формуле

$$m_p = \sqrt{\sigma_n / (500 \cdot 10^5)} - 1. \quad (11.56)$$

m_p принимается равным ближайшему целому числу.

Напряжение в медном проводнике при наличии распорок, Па,

$$\sigma_{np} = \sigma_n / (m_p + 1)^2. \quad (11.57)$$

Боковое давление на распорку, Н,

$$N = 0,981 a_f b_f w_f \left(\frac{2r + l}{2} \right) \left(\frac{2r + L}{m_p + 1} \right) \left(\frac{n_{max}}{1000} \right)^2 \cdot 10^8. \quad (11.58)$$

Пример. Исходные данные: $n_{ном} = 750$ об/мин, $L = 66 \cdot 10^{-2}$ м, $l = 17,7 \times 10^{-2}$ м, $r = 5,95 \cdot 10^{-2}$ м, $a_f = 0,21 \cdot 10^{-2}$ м, $b_f = 3,5 \cdot 10^{-2}$ м, $w_f = 65$, катушка – с двумя радиусами закругления

$$\mu = 5,95 \cdot 10^{-2} / (66 \cdot 10^{-2}) = 0,09.$$

По рис. 11.37 $k = 0,93$.

Из (11.54)

$$\sigma_n = 0,49 \frac{(2 \cdot 5,95 + 17,7) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-2}} (2 \cdot 5,95 + 66)^2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1,2 \cdot 750}{1000} \right)^2 \times$$

$$\times 0,93 \cdot 10^8 = 94,7 > 50 \text{ МПа}.$$

Определяем число распорок:

$$m_p = \sqrt{947 \cdot 10^5 / (500 \cdot 10^5)} - 1 = 0,37;$$

принимаем $m_p = 1$, тогда

$$\sigma_{пр} = 940 \cdot 10^5 / (1 + 1)^2 = 234 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Боковое давление на распорку по (11.58)

$$N = 0,981 \cdot 0,21 \cdot 10^{-2} \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 65 \left[\frac{(2 \cdot 5,95 + 17,7) \cdot 10^{-2}}{2} \right] \times$$

$$\times \left[\frac{(2 \cdot 5,95 + 66) \cdot 10^{-2}}{1 + 1} \right] \left(\frac{1,2 \cdot 750}{1000} \right)^2 \cdot 10^8 = 21\,800 \text{ Н}.$$

Расчет кромки полюсного наконечника. Наиболее опасным сечением полюсного наконечника является сечение А–А (рис. 11.39). Кромка полюса испытывает изгибающий момент от центробежных сил обмотки и самой кромки. При наличии межполюсных распорок, опирающихся

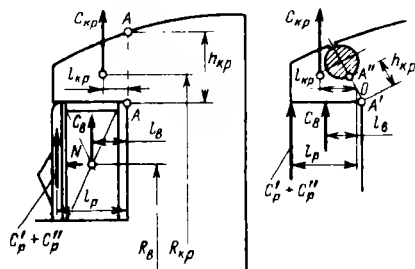


Рис. 11.39. Силы, действующие на кромку полюса

на кромку полюса, на нее будут также действовать моменты от сил бокового давления обмотки через распорку и от центробежной силы распорки. Поэтому при проектировании полюса, главным образом полюса быстроходных машин, необходимо проверить напряжение в кромке.

Центробежная сила 1 м обмотки, Н/м,

$$C_{\text{н}} = 10,3 a_f b_f w_f R_{\text{н}} \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 \cdot 10^7. \quad (11.59)$$

Центробежная сила кромки полюса, Н/м,

$$C_{\text{кр}} = 11,0 m_{\text{кр}} R_{\text{к}} \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 \cdot 10^3, \quad (11.60)$$

где $m_{\text{кр}}$ — масса кромки полюса, кг/м; $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{кр}}$ — расстояние от оси вращения до центра тяжести обмотки и кромки полюса, м; a_f и b_f — размеры проводника обмотки возбуждения, м.

Сила, действующая на 1 м от бокового давления обмотки через распорку, Н/м,

$$C'_p = N \frac{\operatorname{tg} \alpha}{B}, \quad (11.61)$$

где N — сила бокового давления на распорку по (11.58); $\alpha = 180^\circ / (2p)$ — половина угла между соседними полюсами; B — опорная на кромку длина (аксиальная) распорки, м.

Сила, действующая на 1 м кромки, от центробежной силы распорки, Н/м,

$$C''_p = C_p / (2B \cos \alpha), \quad (11.62)$$

где C_p — полная центробежная сила распорки, Н:

$$C_p = 11,0 m_p R_p \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 10^3,$$

m_p — полная масса распорки, кг; R_p — расстояние от оси вращения до центра тяжести распорки, м.

Изгибающий момент в сечении А—А на единицу длины, Н · м/м,

$$M_{\text{и}} = C_{\text{в}} l_{\text{в}} + C_{\text{кр}} l_{\text{кр}} + (C'_p + C''_p) l_p, \quad (11.63)$$

где $l_{\text{в}}$, $l_{\text{кр}}$, l_p — плечи сил до центра сечения А—А, м.

Напряжение от изгиба в кромке полюсного наконечника, Па,

$$\sigma_{\text{кр}} = 6M_{\text{и}} / h_{\text{кр}}^2, \quad (11.64)$$

где $h_{кр}$ – высота сечения $A-A$ кромки полюса, м.

Допустимое напряжение в кромке от изгиба для стали марки Ст3 составляет 70 МПа при толщине листов полюса 1 мм и 100 МПа при толщине листов полюса 1,5 мм. При наличии демпферной обмотки допускаемые напряжения соответственно будут 90 и 130 МПа. Если в сечение $A-A$ попадает отверстие для стержня демпферной (пусковой) обмотки, то из высоты сечения следует вычесть высоту шлица и диаметр паза. При смещении паза плечи $l_{\text{в}}$, $l_{\text{кр}}$ и $l_{\text{р}}$ следует брать до центра тяжести сечения $A'' - A'$, как показано на рис. 11.39, при этом высоту сечения принимают равной $A'' - A'$.

Пример. Исходные данные: $n_{\text{ном}} = 750$ об/мин, $a_f = 0,21 \cdot 10^{-2}$ м, $b_f = 3,5 \times 10^{-2}$ м, $w_f = 65$, $\alpha = 22,5^\circ$, $R_{\text{кр}} = 59,2 \cdot 10^{-2}$ м, $R_{\text{в}} = 48,5 \cdot 10^{-2}$ м, $C_{\text{р}} = 8900$ Н, $B = 8 \cdot 10^{-2}$ м, масса кромки $m_{\text{кр}} = 17,3$ кг/м, $N = 21\,800$ Н, $l_{\text{в}} = 2,2 \cdot 10^{-2}$ м, $l_{\text{кр}} = 2 \cdot 10^{-2}$ м, $l_{\text{р}} = 3,8 \cdot 10^{-2}$ м, $h_{\text{кр}} = 4,8 \cdot 10^{-2}$ м.

Из (11.59)

$$C_{\text{в}} = 10,3 \cdot 0,21 \cdot 10^{-2} \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 65 \cdot 48,5 \cdot 10^{-2} \left(\frac{1,2 \cdot 750}{1000} \right)^2 \cdot 10^7 = \\ = 193 \cdot 10^3 \text{ Н/м};$$

из (11.60)

$$C_{\text{кр}} = 11,0 \cdot 17,3 \cdot 59,2 \cdot 10^{-2} \left(\frac{1,2 \cdot 750}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 91,25 \cdot 10^3 \text{ Н/м};$$

из (11.61)

$$C'_{\text{р}} = 21\,800 \frac{0,41}{8 \cdot 10^{-2}} = 112 \cdot 10^3 \text{ Н/м};$$

из (11.62)

$$C''_{\text{р}} = \frac{8900}{2 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 0,91} = 61,0 \cdot 10^3 \text{ Н/м}.$$

Изгибающий момент по (11.63)

$$M_{\text{и}} = 193 \cdot 10^3 \cdot 2,2 \cdot 10^{-2} + 91,5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-2} + (112 + 61) \cdot 10^3 \cdot 4,0 \cdot 10^{-2} = \\ = 129,56 \cdot 10^2 \text{ Н} \cdot \text{м/м}.$$

Напряжение от изгиба в кромке по (11.64)

$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{6 \cdot 129,56 \cdot 10^2}{4,8^2 \cdot 10^{-4}} = 337 \cdot 10^5 \text{ Па} < 90 \text{ МПа}.$$

Расчет козырька щеки полюса. На козырек щеки действует центробежная сила лобовой части обмотки возбуждения, которая стремится его отогнуть. Наибольшее напряжение изгиба возникает в месте пере-

хода козырька к нажимной части щеки (сечение $I-I$ на рис. 11.40, а). Момент центробежных сил лобовой части обмотки, имеющей один радиус закругления, $H \cdot м$,

$$M_{ц} = 10,3 a_f w_f R_B r_2^3 B (n_{max}/1000)^2 \cdot 10^7; \quad (11.65)$$

для обмотки, имеющей двухрадиусное закругление, (рис. 11.40, б), $H \cdot м$,

$$M_{ц} = 10,3 a_f w_f R_B (B r_2^3 + l k'^2) (n_{max}/1000) \cdot 10^7, \quad (11.66)$$

где R_B — расстояние от оси вращения до центра тяжести сечения обмотки, м; l — длина прямолинейного участка лобовой части обмотки, м; B — по кривой рис. 11.40; $\cos \alpha = 1 - k'/r_2$; l, k', r_2 , м — по рис. 11.40.

Момент сопротивления козырька щеки в сечении $I-I$, $м^3$,

$$W = \frac{bh^2}{6} \varphi; \quad (11.67)$$

здесь b и h , м, — по рис. 11.40; φ — по рис. 11.40 в зависимости от отношения h_1/h .

Напряжение изгиба в сечении $I-I$ козырька щеки, Па,

$$\sigma_{и} = 1,15 M_{и} / W. \quad (11.68)$$

Коэффициент 1,15 учитывает увеличение напряжения от собственной центробежной силы козырька щеки.

Допустимое напряжение для стали марки Ст3 $\sigma_{и} = 120$ МПа, для стали марки Ст5 $\sigma_{и} = 150$ МПа.

Пример. Исходные данные: $n_{ном} = 750$ об/мин, $a_f = 0,21 \cdot 10^{-2}$ м, $w_f = 65$, $R_B = 48,5 \cdot 10^{-2}$ м, $r_2 = 7,5 \cdot 10^{-2}$ м, $l = 17,7 \cdot 10^{-2}$ м, $k' = 4,5 \cdot 10^{-2}$ м, $b = 25 \times 10^{-2}$ м, $h = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м, $h_1 = 1,4 \cdot 10^{-2}$ м, $\cos \alpha = 1 - \frac{4,5 \cdot 10^{-2}}{7,5 \cdot 10^{-2}} = 0,4$.

По рис. 11.40 $B = 0,2$.

Из (11.66)

$$M_{и} = 10,3 \cdot 0,21 \cdot 10^{-2} \cdot 65 \cdot 48,5 \cdot 10^{-2} \cdot \left(0,2 \cdot 7,5^3 \cdot 10^{-6} + \frac{17,7 \cdot 4,5^2 \cdot 10^{-6}}{2} \right) \cdot \left(\frac{1,2 \cdot 750}{1000} \right)^2 \cdot 10^7 = 14,5 \cdot 10^2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

из (11.67)

$$W = \frac{25 \cdot 10^{-2} \cdot 2,8^2 \cdot 10^{-4}}{6} \cdot 0,44 = 14,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

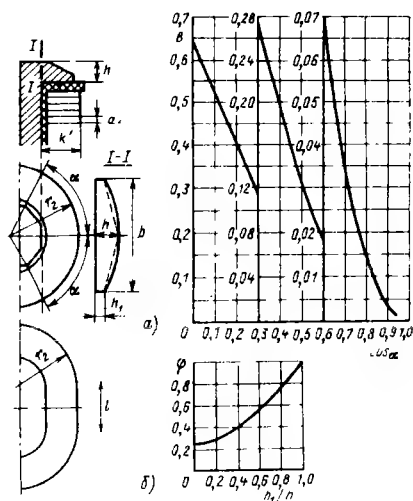


Рис. 11.40. К расчету козырька щеки полюса

$$\text{(при } h_1/h = \frac{1,4 \cdot 10^{-2}}{2,8 \cdot 10^{-2}} = 0,5 \text{ по рис. 11.40}$$

$$\varphi = 0,44).$$

Напряжение изгиба по (11.68)

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{1,15 \cdot 14,5 \cdot 10^2}{14,4 \cdot 10^{-6}} = 1158 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Расчет лобовой части катушки полюса. У машин относительно небольшой мощности или имеющих невысокую частоту вращения иногда центробежные силы, действующие на лобовые части обмотки возбуждения, получаются небольшими. В этом случае у щеки полюса можно не делать козырька, поддерживающего части обмотки. При решении вопроса о целесообразности установки щеки с козырьком или без него можно исходить из следующего расчета.

Статический момент площади лобовой части, м^3 ,

$$M = B_1 r_1^3 - B_2 r_2^3 + b_f l (r_2 - x + 0,5 b_f); \quad (11.69)$$

при $l = 0$

$$M = B_1 r_1^3 - B_2 r_2^3,$$

где b_f — ширина проводника катушки, м; r_1, r_2, l, x, M — по

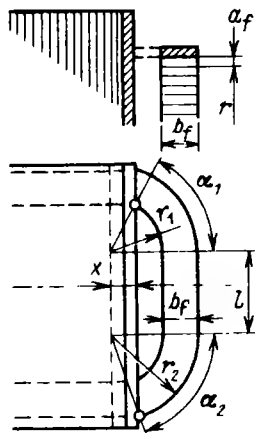


Рис. 11.41. Лобовая часть катушки полюса

рис. 11.41; B_1 и B_2 — коэффициенты, значения которых принимаются по рис. 11.40 по $\cos \alpha_2 = x/r_2$ для B_2 или $\cos \alpha_1 = x/r_1$ для B_1 .

Напряжение изгиба в меди от собственной центробежной силы, Па,

$$\sigma = 0,295 \frac{Mr}{b_f a_f} \left(\frac{n_{\max}}{1000} \right)^2 \cdot 10^9, \quad (11.70)$$

где r — расстояние от оси вращения до наиболее удаленного витка, м; a_f — толщина проводника обмотки возбуждения, м.

Если расчетное напряжение изгиба меди превышает $500 \cdot 10^5$ Па, то применяют щеку с козырьком.

Пример. Исходные данные: $2p = 20$, $n_{\text{ном}} = 300$ об/мин, $a_f = 0,353 \cdot 10^{-2}$ м, $b_f = 1,68 \cdot 10^{-2}$ м, $r_2 = 4 \cdot 10^{-2}$ м, $r_1 = 5,68 \cdot 10^{-2}$ м, $r = 67,4 \cdot 10^{-2}$ м, $l = 5,2 \times 10^{-2}$ м, $x = 1,8 \cdot 10^{-2}$ м.

Из (11.69)

$$M = 0,26 \cdot 5,68^3 \cdot 10^{-6} - 0,158 \cdot 4^3 \cdot 10^{-6} + 1,68 \cdot 10^{-2} \cdot 5,2 \cdot 10^{-2} \times \\ \times (4 - 1,8 + 0,5 \cdot 1,68) \cdot 10^{-2} = 63,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Для $\cos \alpha_2 = 1,8 \cdot 10^{-2} / (4 \cdot 10^{-2}) = 0,45$ и $\cos \alpha_1 = 1,8 \cdot 10^{-2} / (5,68 \cdot 10^{-2}) = 0,32$ по рис. 11.40 $B_2 = 0,158$, $B_1 = 0,26$.

Напряжение изгиба по (11.70)

$$\sigma = 0,295 \frac{63,6 \cdot 10^{-6} \cdot 67,4 \cdot 10^{-2}}{1,68 \cdot 10^{-2} \cdot 0,353 \cdot 10^{-2}} \left(\frac{1,2 \cdot 300}{1000} \right)^2 \cdot 10^9 = 277 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

У данной машины можно применять щеку без козырька.

11.6. МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАГНИТОПРОВОДА РОТОРА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

В синхронных машинах общего назначения мощностью свыше 100 кВт магнитопровод ротора имеет два вида исполнения. У быстроходных машин магнитопровод выполняется из отдельных дисков (рис. 11.42), которые затем стягиваются шпильками, либо заклепками, либо электросварочным швом. Полюсы к магнитопроводу крепятся с помощью хвостов. В тихоходных машинах ротор выполняется в виде магнитного колеса (рис. 11.43), к ободу которого шпильками прикрепляются полюсы.

При вращении ротора его магнитопровод испытывает растягивающее напряжение центробежной силы, обусловленной собственной силой тяжести и силой тяжести прикрепленных к нему полюсов. Для того чтобы центробежная сила не вызывала остаточной деформации в магнитопроводе, необходимо, чтобы максимальные напряжения были меньше или равны допустимым. Напряжения в магнитопроводе ротора определяют из расчета его на прочность.

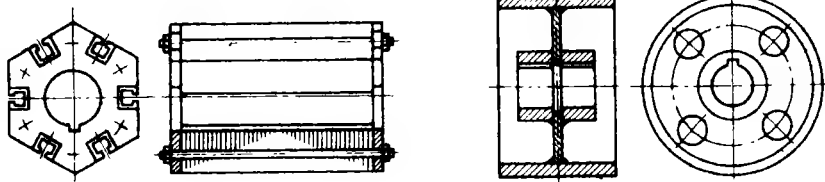


Рис. 11.42. Шихтованный ротор синхронной машины

Рис. 11.43. Ротор синхронной машины в виде сварного магнитного колеса

а) Расчет дискового ротора

Магнитопровод ротора можно разбить на две части: собственно магнитопровод, ограниченный внутренним отверстием вала радиусом R_1 и окружностью радиусом R_2 (до дна пазов), и хвостовую зону, ограниченную внешним контуром сердечника и окружностью радиусом R_2 (см. рис. 11.34).

Масса хвостовой зоны на 1 м длины ротора, кг/м,

$$m'_x = 7800 \left(2pA \frac{H}{2} - \pi R_2^2 \right), \quad (11.71)$$

где A , H , R_2 , м, — по рис. 11.34.

Центробежная сила хвостовой зоны на 1 м длины, Н/м,

$$C_x = 11m'_x \frac{H + R_2}{2} \left(\frac{n_{max}}{1000} \right)^2 \cdot 10^3. \quad (11.72)$$

Центробежная сила полюса с обмоткой на 1 м длины, Н/м,

$$C' = 11(m'_m + m'_{к.в}) R \left(\frac{n_{max}}{1000} \right)^2, \quad (11.73)$$

где m'_m и $m'_{к.в}$ — массы полюса и катушки обмотки возбуждения на 1 м длины, кг/м, по (11.51) и (11.50); R — средний радиус центра тяжести полюса, м.

Радиальное напряжение на поверхности радиуса R_2 , Па,

$$\sigma_p = (2pC' + C'_x) / (2\pi R_2). \quad (11.74)$$

Максимальное тангенциальное напряжение, которое возникает на внутренней поверхности магнитопровода радиусом R_1 , Па,

$$\sigma_\tau = \frac{2}{1 - \alpha^2} \sigma_p + T_1 R_2^2 \left(\frac{n_{max}}{1000} \right)^2 \cdot 10^4, \quad (11.75)$$

где T_1 — коэффициент, определяемый в зависимости от отношения $\alpha = R_1/R_2$ по следующей формуле:

$$T_1 = 72,4(1 + 0,212\alpha^2) \cdot 10^2. \quad (11.76)$$

Тангенциальное напряжение в стали магнитопровода ротора с учетом ослабления шпоночной канавкой, Па,

$$\sigma'_r = \sigma_r \frac{R_2 - R_1}{h_{min}}. \quad (11.77)$$

Если в магнитопроводе имеется отверстие для стяжной шпильки, то из h_{min} следует вычесть диаметр этого отверстия. Напряжение в стали магнитопровода σ'_r не должно превышать 130 МПа.

Пример. Исходные данные: $2p = 8$, $n_{ном} = 750$ об/мин, $A = 32,8 \cdot 10^{-2}$ м, $H = 39,6 \cdot 10^{-2}$ м, $R_1 = 13 \cdot 10^{-2}$ м, $R_2 = 30,4 \cdot 10^{-2}$ м, $R = 51,5 \cdot 10^{-2}$ м, $m'_m + m'_{к.в} = 590$ кг/м, $h_{min} = 16,5 \cdot 10^{-2}$ м.

По (11.71)

$$m_x = 7800 \left(8 \cdot 32,8 \cdot 10^{-2} \frac{39,6 \cdot 10^{-2}}{2} - \pi \cdot 30,4^2 \cdot 10^{-4} \right) =$$

$$= 1789 \text{ кг/м};$$

по (11.72)

$$C'_x = 11 \cdot 1800 \frac{(39,6 + 30,4) 10^{-2}}{2} \left(\frac{1,2 \cdot 750}{1000} \right) \cdot 10^3 = 5613 \text{ Н/м};$$

по (11.73)

$$C' = 11 \cdot 590 \cdot 51,5 \cdot 10^{-2} \left(\frac{1,2 \cdot 750}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 2707 \cdot 10^3 \text{ Н/м}.$$

Радиальное напряжение по (11.74)

$$\sigma_p = \frac{(8 \cdot 2707 + 5613) \cdot 10^3}{2\pi \cdot 30,4 \cdot 10^{-2}} = 142,8 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

По (11.76)

$$T_1 = 72,4 \left[1 + 0,212 \left(\frac{13}{30,4} \right)^2 \right] \cdot 10^2 = 75,2 \cdot 10^2.$$

Тангенциальное напряжение по (11.75) и (11.77)

$$\sigma_r = \frac{2}{1 - (13/30,4)^2} 142,8 \cdot 10^5 + 75,2 \cdot 10^2 \cdot 30,4^2 \cdot 10^{-4} \times$$

$$\times \left(\frac{1,2 \cdot 750}{1000} \right)^2 \cdot 10^4 = 405,9 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$\sigma'_T = 405,9 \cdot 10^5 \frac{(30,4 - 13) \cdot 10^{-2}}{16,5 \cdot 10^{-2}} = 428 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

б) Расчет ротора в виде магнитного колеса

Магнитное колесо представляет собой сварную конструкцию, состоящую из стальной втулки, насаживаемой на вал, обода, к которому прикрепляются полюсы, и диска, соединяющего втулку и обод. Иногда в диске делают отверстия, между которыми образуются своеобразные спицы (рис. 11.44).

Центробежная сила обода, Н,

$$C_0 = 11m_0R_0(n_{max}/1000)^2 \cdot 10^3, \quad (11.78)$$

где m_0 — масса обода, кг:

$$m_0 = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) l_j \cdot 7800 = 6,12 \cdot 10^3 (D_1^2 - D_2^2) l_j. \quad (11.79)$$

$R_0 = 0,25(D_1 + D_2)$ — средний радиус обода, м.

Центробежная сила полюсов с обмотками, Н,

$$C_{\Pi} = 11m_{\Pi}R(n_{max}/1000)^2 \cdot 10^3, \quad (11.80)$$

где m_{Π} — масса всех полюсов с обмотками, кг:

$$m_{\Pi} = m_{м.в} + m_{м.с} + m_{м.кз} + m_m. \quad (11.81)$$

Массы $m_{м.в}$, $m_{м.с}$, $m_{м.кз}$ и m_m определяют из электромагнитного расчета по (9.150)–(9.153); R — радиус центра тяжести полюса с обмотками, м, по (11.49).

Сила, растягивающая втулку, Н,

$$N = (C_0 + C_{\Pi}) / (a\pi), \quad (11.82)$$

где a — расчетный коэффициент:

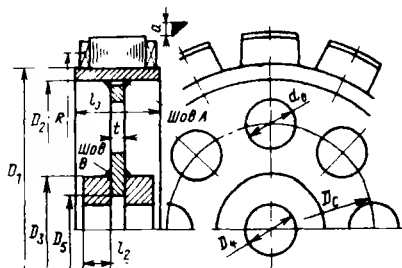


Рис. 11.44. К расчету ротора в виде сварного магнитного колеса

$$\alpha = 1 + \frac{S_1}{R_0} \left(\frac{R_2}{S_2} + \frac{2\pi}{m} \frac{l_c}{S_c} \right); \quad (11.83)$$

$S_1 = 0,5 (D_1 - D_2) l_f$, $S_2 = 0,5 (D_3 - D_4) 2l_2$, $S_c = b_c t$ — площади сечения обода, втулки, спицы, м^2 ; $b_c = \pi D_c / m - d_0$ — расчетная ширина спицы, м ; m — число спиц; $R_2 = 0,25 (D_3 + D_4)$ — средний радиус втулки; $l_c = 0,5 (D_2 - D_3)$ — длина спицы; $D_1, D_2, D_3, D_4, D_c, d_0, t$ — размеры, м , по рис. 11.44.

Сила, передаваемая на втулку, Н ,

$$Q = N \frac{(D_3 - D_4) l_2}{S_2}. \quad (11.84)$$

Напряжения при максимальной частоте вращения, Па :
в обода на растяжение без учета спиц

$$\sigma_0 = \frac{C_0 + C_{\pi}}{2\pi S_1}; \quad (11.85)$$

во втулке

$$\sigma_{вт} = \frac{mN}{2\pi S_2}; \quad (11.86)$$

в швах A

$$\sigma'_1 = \frac{N}{a_1 b_c} \frac{D_c}{D_2}; \quad (11.87)$$

в швах B

$$\sigma'_2 = \frac{mQ}{\pi (D_3 + D_5) a_2},$$

где a_1 и a_2 — размеры сварочных швов A и B , м (рис. 11.44).

Можно принять

$$a_1 = a_2 = a \approx (1 \div 1,5) \cdot 10^{-2} \text{ м}. \quad (11.88)$$

Напряжения при номинальной частоте вращения в швах B , Па :
на растяжение

$$\sigma_2 = \sigma'_2 (n_{\text{ном}} / n_{\text{max}})^2; \quad (11.89)$$

на срез

$$\tau_2 = \frac{0,45 k_1 M_{\text{ном}} D_3}{a_2 (D_3^3 - D_5^3)}, \quad (11.90)$$

где k_1 — коэффициент перегрузки; $k_1 = 1,7 \div 2,5$;

$$M_{\text{ном}} = 9550 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} ;$$

на срез (приведенное)

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_2^2 + 4\tau_2^2} \quad (11.91)$$

Допустимые напряжения в ободе и втулке принимают равными до 100 МПа, в швах на растяжение 80 МПа, на срез 45 МПа.

Пример. Исходные данные: $P_{\text{ном}} = 800$ кВт, $n_{\text{ном}} = 500$ об/мин, $D_1 = 75,46 \times 10^{-2}$ м, $D_2 = 64,46 \cdot 10^{-2}$ м, $D_3 = 35 \cdot 10^{-2}$ м, $D_4 = 21 \cdot 10^{-2}$ м, $D_5 = 25 \cdot 10^{-2}$ м, $D_c = 49,7 \cdot 10^{-2}$ м, $l_j = 45 \cdot 10^{-2}$ м, $l_2 = 13,3 \cdot 10^{-2}$ м, $d_0 = 10 \cdot 10^{-2}$ м, $t = 2,4 \times 10^{-2}$ м, $R = 46 \cdot 10^{-2}$ м, $m_{\text{п}} = 1080$ кг; $m = 4$.

Последовательно применяя (11.78) – (11.91), получаем

$$m_0 = 6,12 \cdot 10^3 (75,46^2 \cdot 10^{-4} - 64,46^2 \cdot 10^{-4}) 45 \cdot 10^{-2} = 423,8 \text{ кг};$$

$$R_0 = 0,25 (75,46 \cdot 10^{-2} + 64,46 \cdot 10^{-2}) = 35 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$C_0 = 11 \cdot 423,8 \cdot 35 \cdot 10^{-2} \left(\frac{1,2 \cdot 500}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 587 \, 387 \text{ Н};$$

$$C_{\text{п}} = 11 \cdot 1080 \cdot 46 \cdot 10^{-2} \left(\frac{1,2 \cdot 500}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 1 \, 967 \, 328 \text{ Н};$$

$$S_1 = 0,5 (75,46 \cdot 10^{-2} - 64,46 \cdot 10^{-2}) 45 \cdot 10^{-2} = 247,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$R_2 = 0,25 (35 \cdot 10^{-2} + 21 \cdot 10^{-2}) = 14 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$S_2 = 0,5 (35 \cdot 10^{-2} - 21 \cdot 10^{-2}) 2 \cdot 13,3 \cdot 10^{-2} = 186 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$b_c = \frac{3,14 \cdot 49,4 \cdot 10^{-2}}{4} \cdot 10 \cdot 10^{-2} = 29 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$l_c = 0,5 (64,46 \cdot 10^{-2} - 35 \cdot 10^{-2}) = 14,73 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$S_c = 29 \cdot 10^{-2} \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} = 69,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$\alpha = 1 + \frac{247,5 \cdot 10^{-4}}{35 \cdot 10^{-2}} \left(\frac{14 \cdot 10^{-2}}{186 \cdot 10^{-4}} + \frac{2\pi}{4} \frac{14,73 \cdot 10^{-2}}{69,6 \cdot 10^{-4}} \right) = 3,88;$$

$$N = \frac{587 \, 387 + 1 \, 967 \, 328}{3,88 \cdot 4} = 164 \, 608 \text{ Н};$$

$$Q = 164 \, 608 \frac{(35 \cdot 10^{-2} - 21 \cdot 10^{-2}) 13,3 \cdot 10^{-2}}{186 \cdot 10^{-4}} = 164 \, 785 \text{ Н};$$

$$\sigma_0 = \frac{587\,387 + 1\,967\,328}{2\pi \cdot 247,5 \cdot 10^{-4}} = 16,4 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma_{\text{вт}} = \frac{4 \cdot 164\,608}{2\pi \cdot 186 \cdot 10^{-4}} = 5,64 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma'_1 = \frac{164\,608}{1 \cdot 10^{-2} \cdot 29 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{49,7 \cdot 10^{-2}}{64,46 \cdot 10^{-2}} = 43,76 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma'_2 = \frac{4 \cdot 164\,608}{\pi(35 \cdot 10^{-2} + 25 \cdot 10^{-2})1 \cdot 10^{-2}} = 34,9 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma_2 = 34,9 \cdot 10^6 \left(\frac{500}{1,2 \cdot 500} \right)^2 = 24,2 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$M_{\text{ном}} = 9550 \frac{800}{500} = 15\,280 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\tau_2 = \frac{0,45 \cdot 2 \cdot 15\,280 \cdot 35 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-2} (35^3 \cdot 10^{-6} - 25^3 \cdot 10^{-6})} = 17,66 \cdot 10^6;$$

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \sqrt{(24,2 \cdot 10^6)^2 + 4(17,66 \cdot 10^6)^2} = 21,4 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Все напряжения находятся в допустимых пределах.

11.7. РОТОРЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЯКОРЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Магнитопроводы роторов асинхронных двигателей и якорей машин постоянного тока с внешним диаметром менее 990 мм собирают из целых листов, которые вырубаются из электротехнической стали толщиной 0,5 мм (рис. 11.45). В листе штампуют пазы, а при необходимости, кроме того, круглые отверстия диаметром 15–35 мм для образования вентиляционных каналов. При большой радиальной высоте листа отверстия располагают в несколько концентрических рядов в шахматном порядке. Для посадки магнитопровода на вал в центре листа штампуются отверстие, в котором предусматривается шпоночная канавка, а также круглая лунка — шихтовочный знак *A*, для того чтобы при шихтовке укладывать все листы в одно и то же положение относительно друг друга. В результате такой укладки пазы получаются с более ровными стенками. После штамповки и снятия заусенцев листы лакируют и подвергают термообработке для создания оксидной пленки. При изготовлении роторов асинхронных двигателей с литой клеткой магнитопроводы сначала собирают из листов на оправке, а после заливки алюминиевой обмотки напрессовывают на вал. При внешних

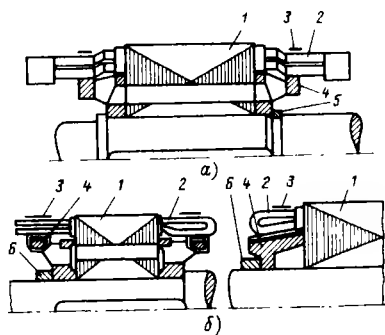
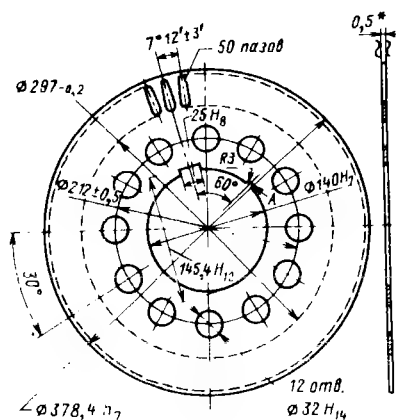


Рис. 11.46. Ротор (а) и якорь (б) из целых листов

Рис. 11.45. Пример листа магнитопровода ротора

диаметрах ротора до 200–300 мм магнитопроводы сажают на гладкий вал горячей посадкой, а при больших диаметрах на валу предусматривается шпонка.

Магнитопроводы роторов, имеющих фазную обмотку или сварную клетку, а также магнитопроводы якорей машин постоянного тока набирают из листов непосредственно на вал (рис. 11.46). Магнитопроводы 1 спрессовывают стальными нажимными шайбами, которые имеют кольцевые пояса 4, называемые обмоткодержателями и предназначенные для поддержки лобовых частей обмотки 2. Выполнение обмоткодержателей выбирается в соответствии с формой лобовых частей обмотки.

Магнитопровод ротора или якоря в спрессованном состоянии фиксируется на валу в осевом направлении или с помощью пружинных колец 5, врезанных в канавку на валу, или втулок 6, насаживаемых на вал с большим натягом. Иногда для фиксации магнитопровода он с одной стороны упирается в предусмотренный на валу буртик. Лобовые части обмотки закрепляют бандажом 3.

При внешнем диаметре ротора или якоря более 990 мм магнитопровод набирается из штампованных сегментов электротехнической стали (рис. 11.47). В этом случае сегменты набирают на ступицах, которые имеют сварную конструкцию (рис. 11.48). Размеры сегментов выбирают исходя из наилучшего раскроя листа. Для крепления в ступице в сегментах с внутренней стороны предусматривают выступы или углубления в форме ласточкина хвоста. Количество крепящих элементов в каждом сегменте должно быть не менее двух. В целях повышения механической прочности, а также улучшения магнитной проводимости

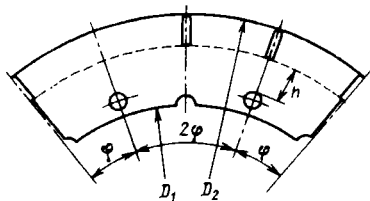


Рис. 11.47. Сегмент якоря

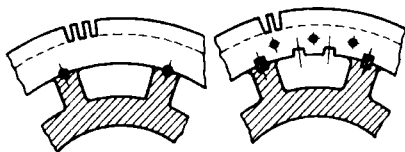


Рис. 11.48. Якорь из сегментов

пакеты собирают с перекрытием сегментов при переходе от слоя к слою.

В осевом направлении сегменты якоря стягивают нажимными фланцами и стяжными шпильками, устанавливаемыми внутри или вне магнитопровода.

Иногда на ступицах собирают магнитопроводы роторов (якорей) при их диаметрах менее 990 мм. Такое выполнение магнитопроводов целесообразно в том случае, когда разность между внутренним диаметром ротора (якоря), найденным из электромагнитного расчета, и диаметром вала получается значительной, а внутреннюю вырубку можно использовать для изготовления магнитопровода меньшего диаметра.

а) Механический расчет магнитопровода

При проектировании роторов (якорей) отдельные их элементы подлежат проверке на механическую прочность.

Расчет напряжений в магнитопроводах. При вращении в магнитопроводах роторов и якорей возникают напряжения от центробежных сил. Наибольшие значения эти напряжения имеют у внутренней поверхности магнитопровода:

$$\sigma = AD_2(n_{max}/1000)^2 \beta \cdot 10^5, \quad (11.92)$$

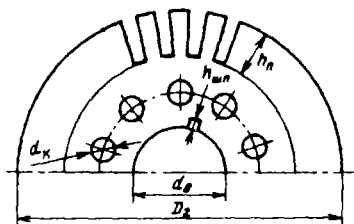
где D_2 — диаметр ротора (якоря), м; β — коэффициент, учитывающий ослабление сечения листа шпоночной канавкой и вентиляционными отверстиями:

$$\beta = \frac{D_2 - 2h_{\text{п}} - d_{\text{к}}}{2H_{\text{min}}};$$

здесь $h_{\text{п}}$ — глубина паза, м (рис. 11.49); $d_{\text{к}}$ — диаметр вентиляционного отверстия, м; H_{min} — минимальная высота ярма ротора (якоря), м:

$$H_{\text{min}} = \frac{D_2 - d_{\text{в}}}{2} - h_{\text{шп}} - h_{\text{п}} - d_{\text{к}};$$

Рис. 11.49. К расчету напряжения в листе магнитопровода якоря



$h_{\text{шп}}$ — высота шпонки; d_v — диаметр вала.

Коэффициент A определяется по табл. 11.8. В таблице принято

$$\epsilon = h_n / D_2; \quad a = d_1 / (D_2 - 2h_n).$$

Допустимое напряжение на электротехнической стали 120×10^6 Па.

Таблица 11.8. Значения коэффициента A

a	ϵ							
	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
0,3	0,0201	0,0208	0,0216	0,0225	0,0236	0,0247	0,0262	0,0277
0,4	0,0208	0,0217	0,0227	0,0238	0,025	0,0263	0,0278	0,0296
0,5	0,0219	0,023	0,0241	0,0254	0,0269	0,0285	0,0304	0,0324
0,6	0,0237	0,0249	0,0265	0,0282	0,0300	0,032	0,0344	0,0369
0,7	0,0259	0,028	0,0303	0,0328	0,0354	0,0382	0,0414	0,044

Расчет колец и втулок, запирающих ротор (якорь) на валу. На кольцо, которым магнитопровод запирается на валу, действует усилие, сдвигающее нажимную шайбу вдоль оси. Это усилие, H , вызывается упругостью спрессованного пакета и находится по формуле

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_{\text{н}}^2 - d_v^2) q, \quad (11.93)$$

где $D_{\text{н}} = D_2 - h_n$ — диаметр окружности, проведенной через середины пазов, м; q — упругость спрессованного пакета, берется как $1/3$ усилия прессовки: $q = (0,5 \div 1) \cdot 10^6$ Па. Большие значения q выбирают для машин меньшей мощности.

Напряжение на срез кольца прямоугольного сечения, Па,

$$\tau = Q / (\pi d_v b), \quad (11.94a)$$

где b — ширина кольца, м.

Для кольца круглого сечения диаметром d_1

$$\tau = Q / (\pi d_{\text{в}} d_1). \quad (11.946)$$

Допустимое значение τ для колец, выполненных из стали, принимается равным $60 \cdot 10^6$ Па.

Втулка, запирающая магнитопровод ротора (якоря) на валу, также находится под действием силы Q , определяемой по (11.93). Для предотвращения сдвига втулки на валу под действием этой силы необходимо, чтобы сила сцепления втулки с валом P превышала силу Q не менее чем в 1,2 раза. Сила P зависит от натяга, т. е. разницы внутреннего диаметра втулки и наружного диаметра вала. Необходимый натяг рассчитывается исходя из геометрических размеров вала, втулки и силы Q , а затем по "Единой системе допусков и посадок" выбирается стандартная посадка. В соответствии с выбранной посадкой устанавливаются допуски на изготовление вала и втулки. После этого уточняется усилие сдвига втулки и проверяется максимальное напряжение на втулке, которое не должно превышать допустимого значения для материала, из которого изготовлена втулка.

Расчет натяга и выбор посадки осуществляется в следующем порядке.

Определяется давление на посадочную поверхность, Па, из формулы

$$p = \frac{P}{Sf} = \frac{1,2Q}{\pi d_{\text{в}} l f}, \quad (11.95)$$

где f — коэффициент трения между сопрягающимися поверхностями (для сталей и чугунов в среднем $f = 0,1 \div 0,15$); S — площадь посадочной поверхности, м^2 : $S = \pi d_{\text{в}} l$ ($d_{\text{в}}$ и l — внутренний диаметр и длина втулки).

Затем определяется необходимый минимальный натяг, м:

$$\Delta_{\min} = p d_{\text{в}} / \Theta, \quad (11.96)$$

где Θ — коэффициент.

Если вал и втулка изготовлены из стали, а вал не имеет отверстия, то

$$\Theta = \frac{E}{1 + (D_{\text{в}}^2 + d_{\text{в}}^2) / (D_{\text{в}}^2 - d_{\text{в}}^2)};$$

здесь E — модуль нормальной упругости (для сталей $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па); $D_{\text{в}}$ — наружный диаметр втулки, м.

По полученному значению натяга $\Delta_{\min}$ выбирается стандартная посадка, имеющая натяг, близкий к расчетному.

Максимальное напряжение на втулке определяется по формуле

$$\sigma = \frac{2p'}{1 - (d_B/D_B)^2} \quad (11.97)$$

Значение p' определяется из (11.96) при максимальном натяге Δ_{max} .

Пример. Рассчитать втулку, запирающую магнитопровод якоря на валу. $D_{II} = 26,5 \cdot 10^{-2}$ м, $d_B = 8 \cdot 10^{-2}$ м, $D_B = 11,5 \cdot 10^{-2}$ м, $l = 3,5 \cdot 10^{-2}$ м и $q = 5 \cdot 10^5$ Па.

По (11.93)

$$Q = \frac{3,14}{4} (26,5^2 - 8^2) \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^5 = 25\,051 \text{ Н};$$

по (11.95)

$$p = \frac{1,2 \cdot 25\,051}{\pi \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,15} = 227,9 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Необходимый минимальный натяг из (11.96)

$$\Delta_{min} = \frac{227,9 \cdot 10^5 \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{5,43 \cdot 10^{10}} = 335,76 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

$$\Theta = \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{1 + \frac{(11,5^2 + 8^2) \cdot 10^{-4}}{(11,5^2 - 8^2) \cdot 10^{-4}}} = 5,43 \cdot 10^{10} \text{ Па}.$$

По стандарту выбираем посадку $80 \frac{H_7 \left(\begin{smallmatrix} +30 \\ 0 \end{smallmatrix} \right)}{t_6 \left(\begin{smallmatrix} +94 \\ +75 \end{smallmatrix} \right)}$ (допуски для вала $\begin{smallmatrix} +94 \\ +75 \end{smallmatrix}$ мкм,

а для втулки $\begin{smallmatrix} +30 \\ 0 \end{smallmatrix}$ мкм). При этой посадке минимальный натяг $\Delta_{min} = 75 - 30 = 45$ мкм ($450 \cdot 10^{-2}$ м), максимальный натяг $\Delta_{max} = 94 - 0 = 94$ мкм (940×10^{-7} м).

Уточняем давление на посадочную поверхность при минимальном натяге из (11.96):

$$p = \frac{450 \cdot 10^{-7} \cdot 5,43 \cdot 10^{10}}{8 \cdot 10^{-2}} = 305,4 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Уточняем силу P по (11.95):

$$P = 305,4 \cdot 10^5 \pi \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,15 = 40\,276 \text{ Н};$$

$$P/Q = 40\,276/25\,051 = 1,61 > 1,2.$$

Давление при максимальном натяге

$$p' = \frac{940 \cdot 10^{-7}}{8 \cdot 10^{-2}} \cdot 5,43 \cdot 10^{10} = 638 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Напряжение на растяжение в сечении втулки по (11.97)

$$\sigma = \frac{2 \cdot 638 \cdot 10^5}{1 - [8 \cdot 10^{-2} / (11,5 \cdot 10^{-2})]^2} = 247,3 \cdot 10^6 < 0,7 \cdot 360 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Проверка прочности зубцов. Зубцы магнитопроводов нагружены центробежной силой, силами от собственного веса, а также от веса обмотки и изоляции, лежащих в пазу. Наиболее слабым в механическом отношении является сечение в основании зуба шириной b_Z . Напряжение растяжения в этом сечении, Па, определяется по формуле

$$\sigma = C'_{Z\Pi} / b_Z. \quad (11.98)$$

Центробежная сила зуба и содержимого паза на 1 м длины якоря, Н/м,

$$C'_{Z\Pi} = 5,5(m'_Z + m'_{o.и}) (D_2 - h_{\Pi}) \left(\frac{n_{max}}{1000} \right)^2 \cdot 10^3, \quad (11.99)$$

где D_2, h_{Π} — внешний диаметр ротора (якоря) и высота паза, м.

Масса зуба на 1 м длины якоря, кг,

$$m'_Z = 7,8 b_{Zcp} h_{\Pi} k_c \cdot 10^3, \quad (11.100)$$

где b_{Zcp} — средняя ширина зуба, м; k_c — коэффициент заполнения пакета сталью.

Масса меди обмотки и ее изоляции на 1 м длины якоря, кг,

$$m'_{o.и} = m'_o + m'_и = [8,9 q_a N_{\Pi} + 2,5 (b_{\Pi} h_{\Pi} - q_a N_{\Pi})] \cdot 10^3, \quad (11.101)$$

где q_a — сечение проводника, м^2 ; N_{Π} — число проводников в пазу; b_{Π} — ширина паза, м.

Проверка прочности шпонок. Шпонки для фиксации магнитопровода обычно выбирают такого же сечения, что и на свободном конце вала. Они рассчитываются на смятие рабочих поверхностей, исходя из наибольшего значения передаваемого момента. Наибольшее распространение получили призматические шпонки. Напряжение смятия, Па,

$$\sigma = \frac{k M_{ном}}{0,25 d_{ш} h_{шп} l_{шп}}, \quad (11.102)$$

где $M_{ном}$ — номинальный момент, Н · м; $h_{шп}, l_{шп}$ — высота и длина шпонки, м.

Коэффициент перегрузки k выбирается равным в пределах 2–3. В шпонках, изготовленных из стали марки Ст5, допустимое напряжение принимается приблизительно равным $150 \cdot 10^6$ Па.

б) Расчет бандажей и клиньев

В пазах роторов и якорей располагаются обмотки, на которые при вращении действуют центробежные силы. Для предотвращения перемещения в радиальном направлении обмотки должны быть надежно закреплены.

Лобовые части обмоток закрепляют бандажами, намотанными из проволоки или стекловолокна. Закрепление пазовой части обмотки посредством бандажей может применяться для машин постоянного тока относительно небольшой мощности (при диаметрах якоря до 300–350 мм), имеющих открытые пазы. Бандажи располагают в специальных канавках магнитопроводов, которые образуются в результате применения листов меньшего диаметра, чем основные (рис. 11.50).

Применение бандажей имеет определенные преимущества, так как при этом уменьшается высота зубца, что приводит к уменьшению магнитного напряжения зубцов и потерь при их перемагничивании. Однако при больших скоростях (при $v_a \geq 35$ м/с) применение бандажей становится нерациональным, так как бандажи перекрывают чрезмерно большую поверхность якоря, что ухудшает его теплоотдачу. При наличии проволоочных бандажей понижается КПД машины из-за потерь в них, а при бандажах из магнитной проволоки ухудшается коммутация. При наличии кольцевых канавок увеличивается воздушный зазор, а следовательно, и магнитное напряжение зазора. Поэтому у более мощных машин обмотки в пазах закрепляют клиньями.

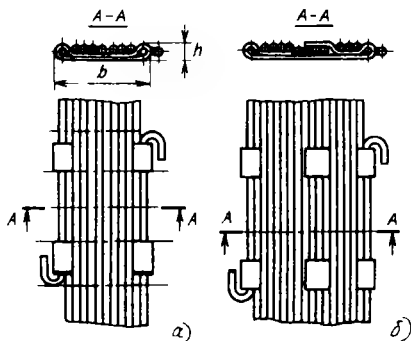
У асинхронных двигателей и машин постоянного тока, имеющих на роторе (якоре) полузакрытые пазы, крепление обмоток в активной части производят клиньями.



Рис. 11.50. Якорь машины постоянного тока с креплением обмотки бандажами

Рис. 11.51. Крепление концов проволоки бандажей якоря:

a — на магнитопроводе; b — на лобовых частях обмотки



Расчет бандажей. Для бандажей применяют магнитную или немагнитную стальную проволоку или стеклоленту. При частотах перемагничивания более 50 Гц и в напряженных по коммутации машинах на активной части преимущественно применяют немагнитную проволоку. Диаметр проволоки для бандажей предварительно выбирают в пределах 0,8–2 мм (меньшие диаметры проволоки берут для машины с меньшим диаметром якоря).

Для уменьшения потерь бандаж делят на части, для чего по длине магнитопровода делают несколько канавок. Длину каждой канавки следует принимать не больше 15–20 мм, а общая длина всех канавок не должна превышать 35% длины магнитопровода. На лобовых частях обмотки ширина бандажей может достигать 40 мм. Более широкие бандажи также следует делить на части или применять укладку в несколько слоев по высоте.

Под проволочными бандажами на пазовой и лобовой частях обмотки якоря подкладывают миканит толщиной 0,3–0,4 мм. Внешний диаметр установленных бандажей не должен превышать внешнего диаметра якоря. Для укрепления бандажей по ширине применяют скрепки из белой жести шириной 8–15 мм, припаиваемые оловянным припоем (рис. 11.51).

По сравнению с проволочными бандажи из стеклоленты, пропитанной синтетическими смолами, имеют преимущества. Они не имеют собственных потерь, не требуют наложения изоляции между бандажом и обмоткой, менее трудоемки в изготовлении. Недостатком таких бандажей является их большая толщина, так как стеклолента имеет меньшую механическую прочность.

При расчете бандажа исходят из того, что он испытывает напряжения от центробежных сил обмотки и самого бандажа. Число витков проволочного бандажа

$$w_b = 1,13 \frac{m(D_2 - h_n)}{d_b(\sigma_{\text{доп}} - \sigma_0)} (n_{\text{max}}/1000)^2 \cdot 10^3, \quad (11.103)$$

где d_b — диаметр проволоки бандажа, м; $\sigma_{\text{доп}}$ — допустимое напряжение растяжения, принимаемое для стальной бандажной проволоки равным $450 \cdot 10^6$ Па; n_{max} — максимальная частота вращения, об/мин; σ_0 — напряжение от центробежных сил бандажа, Па.

Для бандажей из стали

$$\sigma_0 = 2,2D_2^2(n_{\text{max}}/1000)^2 \cdot 10^7. \quad (11.104)$$

При определении числа витков бандажа, располагаемого на магнитопроводе, в (11.103) подставляют массу проводников m_0 и изоляции m_n пазовой части обмотки, кг:

$$m = m_{0.n} = m_0 + m_n = m'_{0.n} Z_2 l, \quad (11.105)$$

где Z_2 — число пазов якоря; l — полная длина магнитопровода якоря, м; $m'_{0.н}$ — по (11.101).

Для нахождения витков бандажа с одной стороны лобовой части в (11.103) подставляют массу $m = m_{л}$, кг:

$$m_{л} \approx 1,2 \cdot 0,7 \cdot 8,9 \cdot 10^3 q_a N_{п} Z_2 \tau, \quad (11.106)$$

где $0,7\tau$ — длина лобовой части проводника, м; q_a — площадь поперечного сечения проводника, м²; коэффициент 1,2 приближенно учитывает массу изоляции.

Число витков бандажа из стеклоленты определяют по формуле

$$w_6 = 0,9 \frac{m(D_2 - h_{п})}{q_{л}(\sigma_{доп} - \sigma_0)} (h_{max}/1000)^2 \cdot 10^3, \quad (11.107)$$

где $q_{л}$ — площадь поперечного сечения ленты, м²; $\sigma_{доп}$ — допустимое напряжение растяжения, равное $150 \cdot 10^6$ Па для стеклоленты класса нагревостойкости В и $130 \cdot 10^6$ Па для класса F.

Для бандажей из стеклоленты, Па,

$$\sigma_0 = 0,51 D_2^2 (n_{max}/1000) \cdot 10^7. \quad (11.108)$$

Для бандажей используется лента ЛСБ (ТУ 6.11.22-70) толщиной 0,18–0,2 мм и шириной 10, 15, 20, 25, 30 мм. Высоту бандажных канавок на магнитопроводе якоря выбирают равной от 2 до 3,5 мм.

Пример. Двигатель постоянного тока имеет данные: $P_{ном} = 75$ кВт, максимальная эксплуатационная частота вращения (при ослаблении поля) 2200 об/мин, $D_2 = 25,8 \cdot 10^{-2}$ м, $l = 26,7 \cdot 10^{-2}$ м, $Z_2 = 27$, $N_{п} = 12$, $h_{п} = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $b_{п} = 1,2 \times 10^{-2}$ м, $q_a = 16,15 \cdot 10^{-6}$ м², $q_{л} = 0,2 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-6}$ м².

Из (11.101)

$$m'_{0.н} = [8,9 \cdot 16,15 \cdot 10^{-6} \cdot 12 + 2,5 (1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-2} - 16,15 \cdot 10^{-6} \cdot 12)] \cdot 10^3 = 2,140 \text{ кг.}$$

Масса пазовой части обмотки с изоляцией по (11.105)

$$m_{0.н} = 2,14 \cdot 27 \cdot 26,7 \cdot 10^{-2} = 15,4 \text{ кг.}$$

Напряжение от центробежных сил по (11.108)

$$\sigma_0 = 0,51 \cdot 25,8^2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1,2 \cdot 2200}{1000} \right)^2 \cdot 10^7 = 2,37 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

По (11.107)

$$w_6 = 0,9 \frac{15,4 (25,8 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-2})}{3 \cdot 10^{-6} \cdot (150 \cdot 10^6 - 2,37 \cdot 10^6)} \left(\frac{1,2 \cdot 2200}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 49,7 \approx 50.$$

Расчет клиньев. Клинья изготавливают из гетинакса, текстолита, стекло-текстолита и дерева (бука, клена, ясеня). Клин рассчитывают на изгиб как балку с сосредоточенной нагрузкой посередине. Эта нагрузка равна центробежной силе пазовой части обмотки. Расчет производится на 1 м. Исходя из этого определяется предварительная высота клина h_k (рис. 11.51), м:

$$h_k \geq 1,22 \sqrt{C' b_k / \sigma_{\text{доп}}}. \quad (11.109)$$

Центробежная сила пазовой части обмотки на 1 м, Н/м,

$$C' = 5,5 m'_{0.н} (D_2 - h_{\text{п}}) \left(\frac{h_{\text{max}}}{1000} \right)^2 \cdot 10^3,$$

где $m'_{0.н}$ — по (11.101); b_k — средняя ширина клина, м (рис. 11.52),

$$b_k \approx b_{\text{п}} + (1 \div 3) \cdot 10^{-3}.$$

Допустимое напряжение на изгиб $\sigma_{\text{доп}}$ для гетинакса равно 20 МПа, для текстолита 35 МПа, для дерева при расположении волокон поперек паза 8 и вдоль паза 4 МПа.

По найденной высоте h_k из табл. 11.9 подбирают нормализованные размеры клина. Приведенные в таблице размеры даны в соответствии с рис. 11.52. По производственным соображениям высота клина должна составлять не менее $0,25b_{\text{п}}$.

После выбора клина проводят проверочный расчет. Напряжение на изгиб, Па,

$$\sigma = 1,5 C' b_k / h_k^2. \quad (11.110)$$

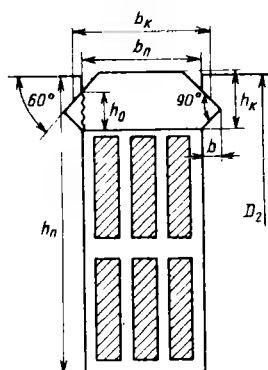


Рис. 11.52. К расчету пазового клина

Таблица 11.9

h_k , мм	3	4	5	6	7	8
b_k , мм	$b_{\text{п}} + 1$	$b_{\text{п}} + 1,2$	$b_{\text{п}} + 1,8$	$b_{\text{п}} + 2,3$	$b_{\text{п}} + 2,9$	$b_{\text{п}} + 3,2$
h_0 , мм	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7

Напряжение на срез, Па,

$$\tau = 0,5C' / h_0, \quad (11.111)$$

где h_0 — в метрах по рис. 11.52 и табл. 11.9.

Допустимое напряжение на срез τ для гетинакса равно 10 МПа, для текстолита 15 МПа, для дерева при расположении волокон поперек паза 4 и вдоль паза 2 МПа.

Пример. Тот же двигатель, что и в предыдущем примере ($P_{\text{ном}} = 75$ кВт). Размеры паза $h_{\text{п}} \times b_{\text{п}} = 3,6 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-2}$ м. Остальные данные те же.

Из (11.101)

$$m'_{\text{о.и}} = [8,9 \cdot 16,15 \cdot 10^{-6} \cdot 12 + 2,5 (1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 3,6 \cdot 10^{-2} - 16,15 \cdot 10^{-6} \cdot 12)] \cdot 10^3 = 2,320 \text{ кг.}$$

Центробежная сила пазовой части обмотки

$$C' = 5,5 \cdot 2,320 (25,8 \cdot 10^{-2} - 3,6 \cdot 10^{-2}) \left(\frac{1,2 \cdot 2200}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 19,74 \cdot 10^3 \text{ Н/м.}$$

Материал клина — текстолит с $\sigma = 35$ МПа. Выбираем $b_{\text{к}} \approx 14 \cdot 10^{-3}$ м.

Из (11.109)

$$h_{\text{к}} \geq 1,22 \sqrt{\frac{19,74 \cdot 10^3 \cdot 14 \cdot 10^{-3}}{350 \cdot 10^5}} = 3,43 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

По табл. 11.9 выбираем клин с $h_{\text{к}} = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $b_{\text{к}} = 12 + 1,2 = 13,2$ мм; $h_0 = 3,5$ мм.

Проводим проверку:

по (11.110)

$$\sigma = 1,5 \frac{19,74 \cdot 10^3 \cdot 13,2 \cdot 10^{-3}}{4^2 \cdot 10^{-6}} = 24,4 \cdot 10^6 < 35 \cdot 10^6 \text{ Па;}$$

по (11.111)

$$\tau = 0,5 \frac{19,74 \cdot 10^3}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 2,82 \cdot 10^6 < 15 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Выбранный клин имеет достаточную механическую прочность.

11.8. КОЛЛЕКТОРЫ

Коллектор является ответственной и сложной частью машины постоянного тока. Он состоит из коллекторных пластин, которые изготавливают из твердотянутой меди трапециевидального сечения толщиной 3–15 мм. Иногда для повышения механической прочности применяют

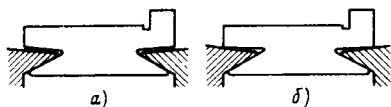


Рис. 11.53. Способы крепления коллекторных пластин

пластины из меди с присадкой кадмия. Для изоляции медных пластин друг от друга между ними укладывают прокладки из специального коллекторного миканита толщиной 0,8–1,5 мм. Набор коллекторных пластин с изоляцией между ними должен быть прочно закреплен и иметь строго цилиндрическую форму при всех режимах работы машины. Существующие конструкции коллекторов различают по способу крепления пластин и имеют большое многообразие. Здесь рассматриваются наиболее употребляемые в современных машинах способы крепления: нажимными конусными фланцами и конструкционной пластмассой.

При креплении нажимными конусными фланцами коллекторные пластины выполняют в виде ласточкина хвоста. Изоляционные прокладки между пластинами — такой же формы. Коллекторы с креплением нажимными конусными фланцами делят на арочные и клиновидные. В первом случае нажим на пластины осуществляется только на ласточкин хвост (рис. 11.53, а), во втором — на ласточкин хвост и концы пластин (рис. 11.53, б).

Наибольшее распространение получили арочные коллекторы, как более технологичные. На рис. 11.54 и 11.55 показаны конструкции таких коллекторов.

На рис. 11.54 нажимные фланцы 1, надетые на втулку 2, стягиваются кольцевой гайкой 3. Для изоляции всех коллекторных пластин от корпуса на нажимные фланцы надевают прессованные из миканиты манжеты 4, а на втулку — миканитовый цилиндр 5. Со стороны якоря у коллекторной пластины имеется выступ 6, называемый петушком,

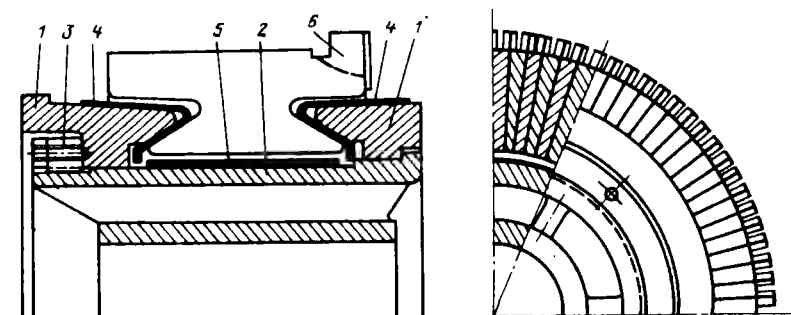


Рис. 11.54. Коллектор малых машин

Рис. 11.55. Коллектор крупных машин

в котором выфрезеровывается шлиц. В этот шлиц закладывают, а затем припаивают проводники обмотки якоря.

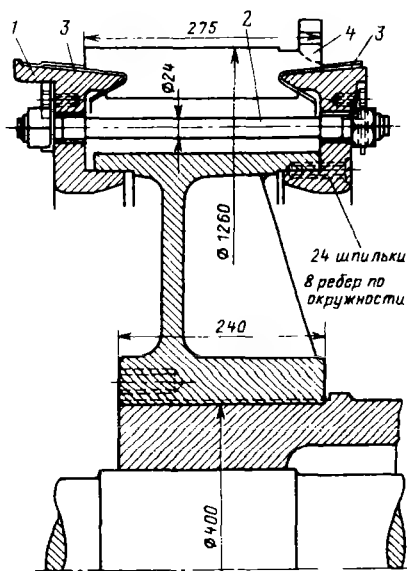
Рассмотренную конструкцию применяют при диаметрах коллекторов до 200–250 мм и малой длине. В коллекторах с общей длиной более 200 мм не рекомендуется применять затяжку фланцев кольцевой гайкой, так как в этом случае при нагреве пластин из-за температурной деформации происходит бочкообразный выгиб пластин.

Пример конструкции коллекторов с большими диаметрами показан на рис. 11.55. Здесь нажимные фланцы 1 стягивают стальными шпильками 2. На фланцы надевают миканитовые манжеты 3. При большой разнице в диаметрах якоря и коллектора в шлиц пластины впаивают медные полоски 4 — петушки, к которым присоединяют проводники якоря.

При высоких окружных скоростях коллекторов и относительно большой их длине для повышения прочности применяют конструкцию коллекторов с бандажными кольцами. Стальные бандажные кольца, насаженные на внешнюю поверхность коллектора, осуществляют стяжку его пластин. Для предотвращения замыкания коллекторных пластин посадку колец производят на миканитовые пояски.

В корпусе коллекторов вентилируемых машин предусматривают каналы для прохода воздуха.

В коллекторах относительно небольших размеров (с внешним диаметром до 40–50 см) в настоящее время находит широкое применение крепление пластин пластмассами (рис. 11.56). По сравнению с креплением нажимными фланцами такие коллекторы более надежны в эксплуатации в отношении сохранения правильной цилиндрической формы, имеют меньшую трудоемкость изготовления и себестоимость за счет отсутствия механической обработки пластин на станке. Для посадки коллектора на вал внутри его предусматривают стальную втулку 1, в которой для лучшего сцепления с пластмассой проточены кольцевые канавки. Пластмассу 2 впрессовывают в простран-



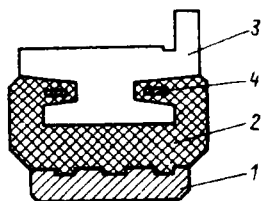


Рис. 11.56. Коллектор на пластмассе

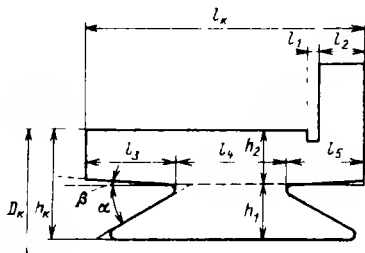


Рис. 11.57. Коллекторная пластина

ство между втулкой и коллекторными пластинами. Для этого применяют пластмассу марки К6 или АГ-4. В целях повышения механической прочности в углубления коллекторных пластин 3 вкладывают армировочные кольца 4, выполненные из стальной проволоки или полосы. Размеры колец и число их витков зависят от диаметра коллектора. Показанная на рис. 11.56 конструкция коллектора применяется при диаметрах до 25 см.

Во избежание замыкания коллекторных пластин кольцами миканитовые прокладки между пластинами в хвостовой части имеют большие размеры, в результате чего образуются выступы.

Внешний диаметр коллектора D_K , его общую длину l_K и ширину коллекторного деления b_K определяют из электромагнитного расчета. Ниже даны некоторые соотношения, позволяющие выбрать размеры коллекторных пластин (рис. 11.57). В дальнейшем эти размеры могут быть уточнены по результатам механического расчета.

Высоту коллекторной пластины принимают равной:

$$h_K \approx (0,80 \div 1,15) \sqrt{D_K}. \quad (11.112)$$

Высота ласточкина хвоста

$$h_1 \approx (0,5 \div 0,55) h_K. \quad (11.113)$$

Для равномерного распределения центробежных сил ласточкины хвосты стараются располагать несимметрично: $l_3 > l_5$. При выборе длины l_4 можно исходить из соотношения

$$l_4 \geq (1,2 \div 1,6) h_1. \quad (11.114)$$

Ширину выточки l_1 , нужной для выхода шлифовального круга и фрезы при продорожке изоляции между пластинами, берут равной 6–8 мм.

Размер l_2 выбирается для якорей с многовитковыми секциями равным 12–15 мм, а для якорей с одновитковыми секциями 15–20 мм.

Толщина миканитовых манжет равна 1–1,5 мм, а миканитового цилиндра 0,75–1 мм.

Профиль ласточкина хвоста задается углами α и β , которые обычно применяются равными соответственно 30 и 3°. При диаметре коллектора до 15 см эти углы принимаются равными 45 и 3°. Число шпилек для стягивания нажимных фланцев зависит от диаметра коллектора. При D_K до 50 см число шпилек выбирается в пределах от 6 до 12. Диаметр шпилек не рекомендуется брать менее 16 мм.

а) Механический расчет коллектора с нажимными конусными фланцами

Ниже дается упрощенная методика, которая позволяет получить удовлетворительные результаты для большинства практических случаев.

В предлагаемой методике механического расчета коллектора проводится проверка напряжений в наиболее опасных сечениях пластины, стяжных болтах и миканитовой манжете. Опасными сечениями коллекторных пластин являются сечения I–I, II–II, III–III (рис. 11.58).

При расчете напряжений в сечениях I–I и II–II консольную часть пластины рассматривают как балку с заделанным концом, на которую действует распределенная нагрузка. Распределенная нагрузка создается двумя силами: центробежной силой части пластины C_K и радиальной составляющей силы арочного распора F_K , которая возникает в результате сжатия пластины нажимными фланцами.

Консольные части пластины рассчитывают для изношенного коллектора. Радиальный износ ϵ можно принять до 20–40% h_2 (рис. 11.58).

Исходя из сказанного, напряжение изгиба в сечении I–I, Па, находится как

$$\sigma_{K1} = \frac{3}{2} \frac{l (C_{K1} + F_{K1})}{b_{K1} (h_2 - \epsilon)^2}, \quad (11.115)$$

где b_{K1} — средняя толщина консольной части пластины, м:

$$b_{K1} = \frac{\pi (D_K - h_2 - \epsilon)}{K} - b_n;$$

здесь b_n — толщина миканитовой прокладки; K — число коллекторных пластин; l_3 , h_2 , D_K — размеры, м, по рис. 11.57.

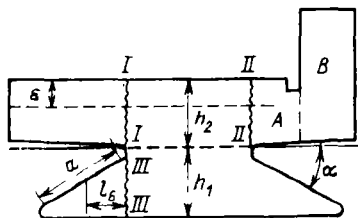


Рис. 11.58. К расчету коллектора

Центробежная сила $C_{к1}$, Н, определяется по формуле

$$C_{к1} = 11m_{к1}R_{01}(n_{max}/1000)^2 \cdot 10^3, \quad (11.116)$$

где $R_{01} = (D_k - h_2 - e)/2$ — радиус инерции консолиной части, м;
 $m_{к1}$ — масса выступа (консолиной части), кг:

$$m_{к1} = 8900S_{к1}b_{к1};$$

$S_{к1}$ — площадь боковой поверхности выступа, м².

Радиальная составляющая силы арочного распора, Н,

$$F_{к1} = 2p_0S_{к1} \frac{\pi}{K}. \quad (11.117)$$

Давление между пластинами p_0 выбирают таким, чтобы обеспечить сжатие миканитовых прокладок, при котором они не имели бы возможности перемещаться радиально. Это давление может быть определено по эмпирической формуле, Па,

$$p_0 = \left[60 + 5 \left(\frac{n_{max}}{1000} \frac{D_k}{10} \right)^{3/2} \right] \cdot 10^5, \quad (11.118)$$

где D_k — диаметр коллектора, см.

Для сечения II-II напряжение подсчитывают аналогично (с учетом петушков). При расчете напряжения от растягивающих и сжимающих сил в сечении III-III, Па, уголок хвоста рассматривают как балку, сделанную в этом сечении и нагруженную сосредоточенной силой:

$$\sigma_x = \frac{3(C_x + F_{р.х})l_6}{b_{к.х}h_1^2}, \quad (11.119)$$

где $b_{к.х}$ — толщина пластины в средней части хвоста, м:

$$b_{к.х} = \frac{\pi(D_k - 2h_2 - h_1)}{K} - b_k;$$

h_1, l_6 — размеры, м, по рис. 11.58.

Центробежную C_x и радиальную $F_{р.х}$ составляющие силы арочного распора рассчитывают по (11.116) и (11.117). При этом вместо массы $m_{к1}$ должна быть взята полная масса коллекторной пластины и вместо $S_{к1}$ — расчетная площадь боковой поверхности пластины. Радиус инерции берется равным $R_{0к} = (D_k - h_k)/2$. Напряжения σ_x и σ_k не должны превосходить 120 МПа. Напряжение сжатия в миканитовых манжетах, отнесенное к 1 м² площади прилегания манжеты к конусу с углом α , находят как

$$\sigma_m = (C_x + F_{p.x}) / (2b_{k.x} a \cos \alpha), \quad (11.120)$$

где a , m — по рис. 11.58.

Напряжение сжатия не должно превосходить 50 МПа.

Стяжные болты рассчитывают, исходя из осевого давления, которое должны создать нажимные шайбы.

Напряжение в болтах на растяжение, Па

$$\sigma_b = \frac{(C_x + F_{p.x}) K \operatorname{tg} \alpha}{1,56 d_b^2 m_b}, \quad (11.121)$$

где d_b — диаметр болта, м; m_b — число болтов.

Значение σ_b не должно превышать 300 МПа.

Когда фланцы стягивают кольцевой гайкой, проверяют напряжение на срез витков резьбы гайки от силы запрессовки, Па:

$$\sigma_r = \frac{(C_x + F_{p.x}) K \operatorname{tg} \alpha}{2\pi D_r H_r}, \quad (11.122)$$

где D_r , H_r — диаметр резьбы и ширина гайки, м.

Напряжение должно быть не более 80 МПа.

При нагреве коллектора возникают дополнительные напряжения вследствие неодинакового расширения меди и стали. Эти напряжения учитывают путем умножения найденных выше напряжений на коэффициент 1,1–1,2.

Пример. Исходные данные: $D_k = 180 \cdot 10^{-3}$ м, $h_k = 40 \cdot 10^{-3}$ м, $h_1 = 20 \cdot 10^{-3}$ м, $h_2 = 20 \cdot 10^{-3}$ м, $\epsilon = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $l_3 = 30 \cdot 10^{-3}$ м, $l_5 = 25 \cdot 10^{-3}$ м, $l_6 = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $a = 20 \cdot 10^{-3}$ м, $K = 81$, $b_H = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м, $S_k = 27,6 \cdot 10^{-4}$ м², $S_{k1} = 5,7 \cdot 10^{-4}$ м², $S_{k2A} = 1,8 \cdot 10^{-4}$ м², $S_{k2B} = 5,1 \cdot 10^{-4}$ м², $n_{max} = 1,2 \cdot 2200 = 2640$ об/мин, $H_r = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $D_r = 95 \cdot 10^{-3}$ м.

Из (11.118)

$$p_0 = \left[60 + 5 \left(\frac{2640}{1000} \frac{18}{10} \right)^{3/2} \right] \cdot 10^5 = 11,2 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Сечение I–I:

из (11.117)

$$F_{k1} = 2 \cdot 11,2 \cdot 10^5 \cdot 5,7 \cdot 10^{-4} \frac{\pi}{81} = 495 \text{ Н;}$$

$$b_{k1} = \frac{\pi(180 - 20 - 6) \cdot 10^{-3}}{81} - 0,8 \cdot 10^{-3} = 5,17 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

масса консольной части

$$m_{k1} = 8900 \cdot 5,7 \cdot 10^{-4} \cdot 5,17 \cdot 10^{-3} = 26,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг;}$$

радиус инерции консолевой части

$$R_{01} = \frac{(180 - 20 - 6) \cdot 10^{-3}}{2} = 77 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

центробежная сила по (11.116)

$$C_{K1} = 11 \cdot 26,2 \cdot 10^{-3} \cdot 77 \cdot 10^{-3} \left(\frac{2640}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 155 \text{ Н};$$

напряжение изгиба по (11.115)

$$\sigma_{K1} = \frac{3}{2} \frac{30 \cdot 10^{-3} (155 + 495)}{5,17 \cdot 10^{-3} \cdot (20 - 6)^2 \cdot 10^{-6}} = 28,86 \cdot 10^6 < 120 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Сечение II-II (с учетом петушков, рис. 11.58):

$$F_{K2} = 2 \cdot 112 \cdot 10^5 (1,8 + 5,1) \cdot 10^{-4} \frac{\pi}{81} = 599 \text{ Н};$$

центробежную силу определяем для двух участков консолевой части (А и В на рис. 11.58):

$$m_{K2A} = 8900 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot 5,17 \cdot 10^{-3} = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

$$C_{K2A} = 11 \cdot 8,3 \cdot 10^{-3} \cdot 77 \cdot 10^{-3} (2640/1000)^2 \cdot 10^3 = 49 \text{ Н};$$

$$m_{K2B} = 8900 \cdot 5,1 \cdot 10^{-4} \cdot 5,17 \cdot 10^{-3} = 23,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

$$C_{K2B} = 11 \cdot 23,5 \cdot 10^{-3} \cdot 88 \cdot 10^{-3} (2640/1000)^2 \cdot 10^3 = 158 \text{ Н},$$

где $R_{02B} = 88 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ — радиус центра тяжести петушков; напряжение изгиба по (11.115)

$$\sigma_{K2} = \frac{3}{2} \frac{25 \cdot 10^{-3} [(49 + 158) + 599]}{5,17 \cdot 10^{-3} (20 - 6)^2 \cdot 10^{-6}} = 29,8 \cdot 10^6 < 120 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Сечение III-III:

из (11.117)

$$F_{p,x} = 2 \cdot 112 \cdot 10^5 \cdot 27,6 \cdot 10^{-4} \frac{\pi}{81} = 2397 \text{ Н};$$

$$b_{K, \text{ср}} = \frac{\pi (180 - 40) \cdot 10^{-3}}{81} - 0,8 \cdot 10^{-3} = 4,63 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$m_{K, \Pi} = 8900 \cdot 27,6 \cdot 10^{-4} \cdot 4,63 \cdot 10^{-3} = 113,73 \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

$$R_{0K} = \frac{(180 - 40) \cdot 10^{-3}}{2} = 70 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

центробежная сила по (11.116)

$$C_x = 11 \cdot 113,73 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 10^{-3} \left(\frac{2640}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 609,5 \text{ Н};$$

$$b_{к.х} = \frac{\pi(180 - 2 \cdot 20 - 20) \cdot 10^{-3}}{81} - 0,8 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$\sigma_x = \frac{3(609,5 + 2397) \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 20^2 \cdot 10^{-6}} = 56,4 \cdot 10^6 < 120 \cdot 10^6 \text{ Па;}$$

напряжение сжатия в манжетах по (11.120)

$$\sigma_m = \frac{609,5 + 2397}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \sqrt{3}/2} = 21,7 \cdot 10^6 < 50 \cdot 10^6 \text{ Па;}$$

напряжение на срез резьбы гайки по (11.122)

$$\sigma_r = \frac{(609,5 + 2397) \cdot 81 \cdot 1/\sqrt{3}}{2\pi \cdot 95 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 23,6 \cdot 10^6 < 80 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коллектор имеет достаточную механическую прочность.

6) Механический расчет коллектора на пластмассе

При механическом расчете коллектора на пластмассе определяют напряжение в кольце из пластмассы, удерживающем пластину. Давление на кольцевой выступ пластмассового кольца, Па (рис. 11.59), определяется по формуле

$$q_b = \left[\frac{b_n \gamma_n}{2f - a_m} \frac{2m^2}{D_0} + \frac{1}{1 - k_{з.м}} (S_{пл} \gamma_{пл} + S_k \gamma_m k_{з.м}) \frac{E_n}{E_{пл} S_{пр}} (m^2 - 1) + \gamma_m k_{з.м} \right] \times \\ \times \frac{2,76 S_k D_0}{l_b} \left(\frac{n_{max}}{1000} \right)^2 \cdot 10^3, \quad (11.123)$$

где b_n — толщина миканитовой прокладки, м; $\gamma_n = 2000 \text{ кг/м}^3$; $\gamma_{пл} = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\gamma_m = 8900 \text{ кг/м}^3$ — плотности миканита, пластмассы и меди; D_0 — диаметр окружности по центру тяжести коллекторных

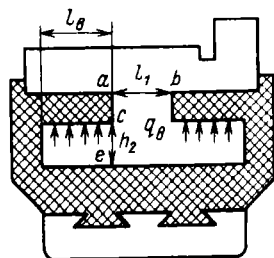


Рис. 11.59. К расчету коллектора на пластмассе

пластин, м; f — коэффициент трения меди по миканиту: $f = 0,05$; $\alpha_m = 2b_n/D_0$ — радианная мера толщины прокладок, рад; $S_{пл}$ — площадь поперечного сечения пластмассового кольца, m^2 ; S_k — боковая площадь коллекторной пластины, m^2 ; $S_{пр}$ — приведенная площадь пластмассового кольца с учетом стальных колец, m^2 :

$$S_{пр} = S_{пл} + 2 \frac{E_{ст}}{E_{пл}} S_{ст};$$

$S_{ст}$ — площадь поперечного сечения армирующего кольца, m^2 ; $E_n = 0,02 \cdot 10^{11}$ Па; $E_{пл} = 0,1 \cdot 10^{11}$ Па; $E_{ст} = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па — модули упругости миканита, пластмассы и стали; m — коэффициент, равный отношению испытательной частоты вращения коллектора к максимальной частоте вращения якоря n_{max} , принимают $m = 1,8$; $k_{з.м}$ — коэффициент заполнения коллектора медью:

$$k_{з.м} = 1 - \frac{K b_n}{\pi(D_k - h_k)};$$

l_b — ширина кольцевого выступа, м.

Напряжение растяжения всего пластмассового кольца, вызванное радиальной деформацией, Па,

$$\sigma_{пл} = q_b l_b D_0 / S_{пр}. \quad (11.124)$$

Предел прочности при растяжении составляет 20 МПа для пластмассы К6 и 80 МПа для пластмассы АГ-4.

Прочность коллекторных пластин проверяется на напряжение в них от арочного распора F и центробежной силы C .

Консольные части пластин проверяют, так же как и в предыдущем случае, по (11.115). Кроме того, проверяется напряжение в сечениях $a-b$ и $c-e$ (рис. 11.59).

Напряжение растяжения пластины в сечении $a-b$, Па,

$$\sigma = (F_1 + C_1) / (b_{к1} l_1), \quad (11.125)$$

где $b_{к1}$, l_1 — толщина коллекторной пластины в сечении $a-b$ и длина хвостовой части пластины в этом сечении, м.

Силы C_1 и F_1 определяют по (11.116) и (11.117) соответственно для части пластины, расположенной выше линии ab .

Напряжение среза в сечении $c-e$, Па,

$$\tau = (F_x + C_x) / (2b_{к2} h_2), \quad (11.126)$$

где $b_{к2}$, h_2 — средняя толщина и высота пластины в сечении $c-e$, м.

Силы C_x и F_x определяют для всей пластины.

Среднее давление между пластинами, обеспечивающее необходимый арочный распор, Па, определяют по формуле

$$p_0 = \left\{ \frac{b_{\text{и}} \gamma_{\text{и}}}{2f - a_{\text{м}}} + \frac{1}{1 - k_{\text{з.м}}} [S_{\text{пл}} \gamma_{\text{пл}} + S_{\text{к}} \gamma_{\text{к}} k_{\text{з.м}} + S_{\text{к}} \gamma_{\text{и}} (1 - k_{\text{з.м}})] \frac{D_0 E_{\text{и}}}{2E_{\text{пл}} S_{\text{пр}}} \right\} 5,5 D_0 \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 \cdot 10^3. \quad (11.127)$$

Пример. Исходные данные: $D_{\text{к}} = 125 \cdot 10^{-3}$ м, $h_{\text{к}} = 30 \cdot 10^{-3}$ м, $b_{\text{и}} = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м, $S_{\text{к}} = 17,8 \cdot 10^{-4}$ м², $S_{\text{пл}} = 13 \cdot 10^{-4}$ м², $S_{\text{ст}} = 0,05 \cdot 10^{-4}$ м², $K = 93$, $D_0 = 102 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{\text{в}} = 15 \cdot 10^{-3}$ м, $m = 1,8$, $m_{\text{max}} = 1,2 \cdot 3000$ об/мин, $h_2 = 8 \cdot 10^{-3}$ м.

Коэффициент заполнения коллектора медью

$$k_{\text{з.м}} = 1 - \frac{93 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}}{\pi(125 - 30) \cdot 10^{-3}} = 0,751.$$

Приведенная площадь пластмассового кольца

$$S_{\text{пр}} = 13 \cdot 10^{-4} + 2 \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{0,1 \cdot 10^{11}} \cdot 0,05 \cdot 10^{-4} = 15,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Из (11.123)

$$q_{\text{в}} = \left[\frac{0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 2000}{2 \cdot 0,05 - \frac{2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}}{102 \cdot 10^{-3}}} + \frac{2 \cdot 1,8^2}{102 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{1 - 0,75} (13 \cdot 10^{-4} \cdot 1800 + 17,8 \cdot 10^{-4} \cdot 8900 \cdot 0,75) \frac{0,02 \cdot 10^{11} (1,8^2 - 1)}{0,1 \cdot 10^{11} \cdot 15,1 \cdot 10^{-4}} + 8900 \cdot 0,75 \right] \frac{2,76 \cdot 17,8 \cdot 10^{-4} \cdot 102 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1,8 \cdot 1,2 \cdot 3000}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 20,7 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Из (9.124)

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{20,7 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 102 \cdot 10^{-3}}{15,1 \cdot 10^{-4}} = 20,97 \cdot 10^6 < 80 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Давление между пластинами по (11.127)

$$p_0 = \left\{ \frac{0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 2000}{2 \cdot 0,05 - \frac{2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}}{102 \cdot 10^{-3}}} + \frac{1}{1 - 0,75} [13 \cdot 10^{-4} \cdot 1800 + \right.$$

$$+ 17,8 \cdot 10^{-4} \cdot 8900 \cdot 0,75 + 17,8 \cdot 10^{-4} \cdot 2000 (1 - 0,75)] \times \\ \times \frac{102 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 0,1 \cdot 10^{11} \cdot 15,1 \cdot 10^{-4}} \left\} 5,5 \cdot 102 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1,8 \cdot 1,2 \cdot 3000}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = \right. \\ = 10,07 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Из (11.117)

$$F_x = 2 \cdot 10,7 \cdot 10^6 \cdot 17,8 \cdot 10^{-4} \frac{\pi}{93} = 1286,1 \text{ Н.}$$

Средняя толщина коллекторной пластины

$$b_{\text{ко}} = \frac{\pi(125 - 30) \cdot 10^{-3}}{93} - 0,8 \cdot 10^{-3} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Средняя толщина пластины в сечении *с-е* (рис. 11.59)

$$b_{\text{к2}} = \frac{\pi(125 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 30 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-3})}{93} - 0,8 \cdot 10^{-3} = \\ = 1,66 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Масса пластины

$$m_{\text{к}} = 8900 \cdot 17,8 \cdot 10^{-4} \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} = 38 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Из (9.116)

$$C_x = 11 \cdot 38 \cdot 10^{-3} \frac{102}{2} 10^{-3} \left(\frac{1,8 \cdot 1,2 \cdot 3000}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 895 \text{ Н.}$$

Напряжение среза в сечении *с-е* по (11.126)

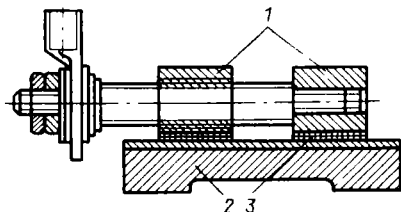
$$\tau = \frac{1286 + 895}{2 \cdot 1,66 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 82 \cdot 10^6 < 120 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коллектор имеет достаточную механическую прочность.

11.9. КОНТАКТНЫЕ КОЛЬЦА

Контактные кольца применяют в синхронных машинах и асинхронных двигателях с фазным ротором. Они располагаются на валу машины, и к ним подсоединяют обмотку ротора. У синхронных машин устанавливают два кольца, а у асинхронных — три. К контактным кольцам синхронных машин через неподвижные щетки подсоединяют источник питания для обмотки возбуждения, а в асинхронных двигателях — пусковой или регулировочный резистор. Контактные кольца или располагают между магнитопроводом ротора и подшипниковым щитом, или выносят за подшипниковый щит. В настоящее время наиболее час-

Рис. 11.60. Контактные кольца на втулке



то применяют последнюю конструкцию, так как в этом случае можно выполнять оба подшипниковых щита одинаковыми, кроме того, устраняется опасность попадания на обмотки щеточной пыли.

Материалом для колец служат сталь, чугун, латунь или медь. На рис. 8.5 показана конструкция узла контактных колец для асинхронных двигателей. На рис. 9.2 приведена конструкция узла колец для синхронных двигателей СДН2.

У машин относительно небольшой мощности контактные кольца 1 в холодном или горячем состоянии напрессовывают на втулку 2, расположенную на валу (рис. 11.60). Для изоляции колец от втулки применяют наложенный в несколько слоев формовочный миканит 3 толщиной 0,5–0,7 мм. При внешнем диаметре до 100 мм контактные кольца иногда выполняют на пластмассе.

Для машин большой мощности применяют кольца с болтовым креплением (рис. 11.61). Контактные кольца 1 изолированы друг от друга и от болтов 3 изоляционными трубками 2. Весь узел прикрепляют к торцу вала 4. Эта конструкция имеет сравнительно небольшую массу, хорошее охлаждение колец, но она менее надежна в отношении прочности крепления и биения.

Механический расчет контактных колец производят в целях определения напряжения в них от действия центробежной силы. Расчет производится для колец после их предельного износа. Предельный диаметральный износ принимают: 8 мм для колец диаметром до 100 мм, 12 мм для диаметров 100–250 мм и 16 мм для диаметров свыше 250 мм.

Центробежная сила кольца, Н,

$$C_K = 11m_K R_K (n_{max}/1000)^2 \cdot 10^3, \quad (11.128)$$

где m_K — масса кольца, кг; R_K — средний радиус кольца, м; n_{max} — максимальная частота вращения, об/мин.

Напряжение на растяжение в опасном сечении (сечение кольца, ослабленное отверстием для контактной шпильки), Па,

$$\sigma = C_K / (2\pi S_K), \quad (11.129)$$

где S_K — площадь сечения кольца, м²:

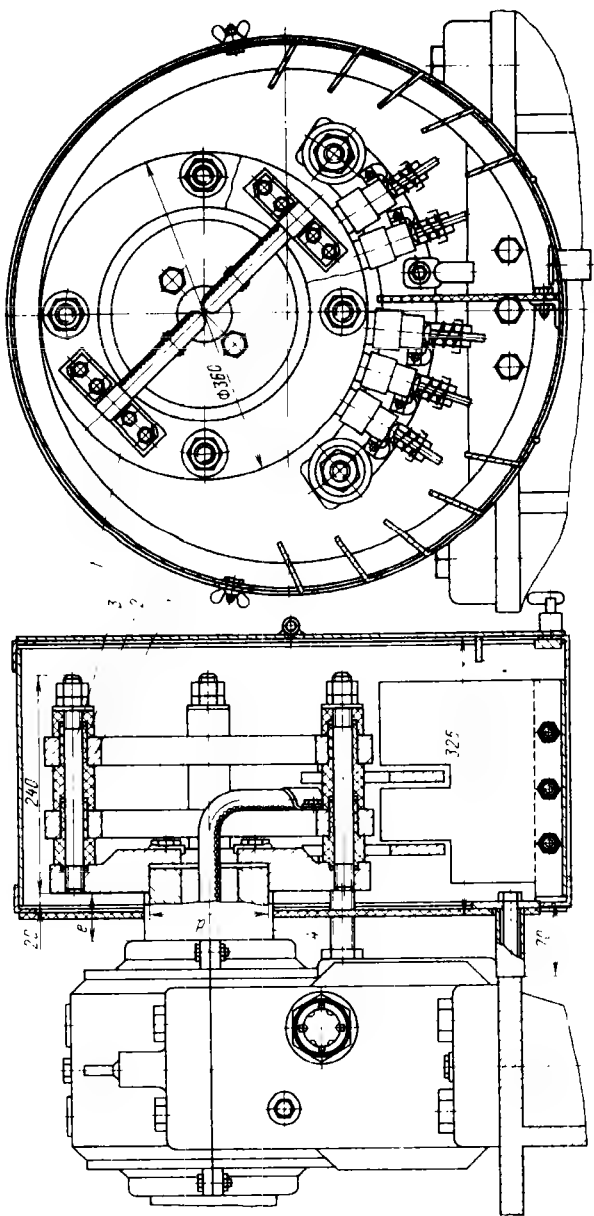


Рис. 11.61. Контактные кольца с болтовым креплением

$$S_K = \left(\frac{D_{из} - D_{в}}{2} - d_0 \right) b_K;$$

$D_{из}$ — внешний диаметр кольца после износа, м; $D_{в}$, d_0 — внутренний диаметр кольца и диаметр отверстия под шпильку, м; b_K — ширина кольца, м.

Напряжения в контактных кольцах, напрессованных на втулку, должны быть рассчитаны с учетом натяга при прессовой посадке по (11.97). Допускаемые напряжения не должны превышать 150 МПа для стальных колец и 75 МПа для латунных.

11.10. ТОКОСЪЕМНЫЙ АППАРАТ

Токосъемный аппарат, предназначенный для съема тока с коллектора или с контактных колец, состоит из щеток, щеткодержателей, щеточных пальцев и траверсы. На рис. 11.62 показаны некоторые из возможных конструкций щеткодержателей.

Щетки для электрических машин прессуют из угольных и графитных порошков. Электрические свойства щеток и стандартизованные их размеры приведены в приложении 5. Для отвода тока в щетки заделываются гибкие плетеные канатики 4, которые вторыми своими концами посредством припаянных к ним наконечников присоединяют к неподвижной части щеткодержателя. Щетки 2 устанавливают в обойму щеткодержателя 1. Щеткодержатели выполняют из латуни литыми или штампованными. Для того чтобы осуществить плотный контакт с коллектором или контактными кольцами, на щетки с помощью пружины 3 осуществляется давление, которое выбирается равным 0,02–0,04 МПа. Щетко-

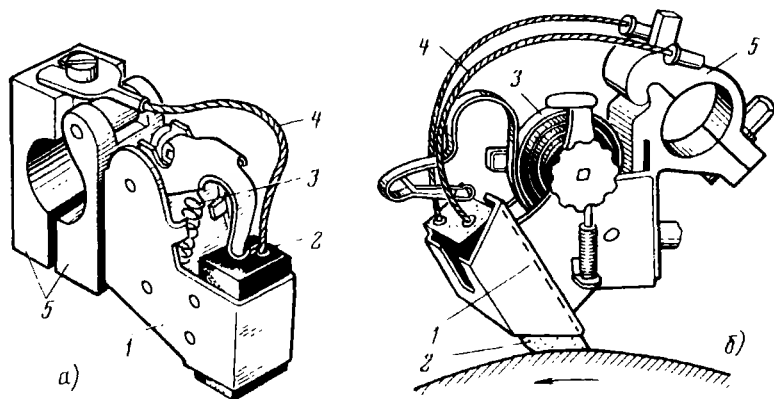


Рис. 11.62. Щеткодержатели машин постоянного тока:

а — радиальный; б — реактивный

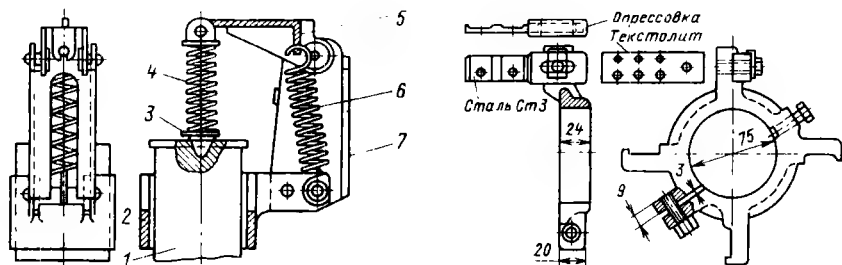


Рис. 11.63. Радиальный щеткодержатель:

1 — щетка; 2 — щеткодержатель; 3 — фарфоровый наконечник; 4 — пружина; 5 — рычаг; 6 — нажимная пружина; 7 — корпус щеткодержателя

Рис. 11.64. Траверса

держатели укрепляют на щеточных пальцах с помощью колодок 5. На щеточном пальце обычно размещают несколько щеткодержателей. Наиболее распространенным видом щеткодержателей являются радиальные (рис. 11.62, а), у них направление щетки совпадает с продолжением радиуса коллектора. Такие щеткодержатели применяют для реверсивных машин, так как условия работы щеток не зависят от направления вращения. На рис. 11.63 показана еще одна конструкция радиального щеткодержателя.

Для машин одностороннего вращения чаще находят применение реактивные щеткодержатели (см. рис. 11.62, б), достоинство которых заключается в том, что при определенном нажиме и угле наклона щетка не упирается в обойму и скользит в ней без трения.

В машинах постоянного тока щеточные пальцы крепят к траверсе, являющейся несущей конструкцией всего узла токосъема. Траверса должна иметь возможность перемещения по окружности в целях установки щеток на геометрическую нейтраль при сборке и наладке машины. На рис. 11.64 показана одна из возможных конструкций траверсы, которая применяется для машин относительно небольших мощностей. Траверсу закрепляют на специальной заточке подшипникового щита стяжными и стопорными болтами.

Пальцы, на которых укрепляют щеткодержатели, представляют собой цилиндрические или призматические стержни. Второе исполнение встречается чаще, так как оно проще в производстве и лучше фиксирует положение щеток. Призматические пальцы выполняют из гетинакса или текстолита либо из полосы стали, опрессованной в месте крепления с траверсой. Цилиндрические пальцы изолируют от траверсы механическими втулками и шайбами или опрессовывают пластмассой. Число пальцев в машине обычно равно числу полюсов. Щеточные паль-

цы одинаковой полярности соединяют между собой медными шишами или проводами.

Щеткодержатели асинхронных и синхронных машин находятся на изолированной части пальца, металлический конец которого запрессован или ввинчен в прилив подшипникового щита.

Иногда у машин постоянного тока применяется также крепление щеточных пальцев непосредственно к подшипниковому щиту. Такое крепление пальцев принято, например, у машин серии 2П с высотой оси вращения $h = 355 \div 500$ мм.

Контрольные вопросы

1. Как изменяется конструкция магнитопроводов статоров машин переменного тока в зависимости от их размеров?
2. Для какой цели делаются бандажные кольца обмотки статора?
3. Как выполняются станины статоров?
4. Для какой цели проводятся расчеты вала на жесткость и прочность?
5. В каких случаях применяются шариковые и роликовые подшипники?
6. По каким данным производится выбор по каталогу подшипников качения?
7. Как устроены и в каких случаях применяются подшипники скольжения?
8. Как производится расчет крепления главных и добавочных полюсов машин постоянного тока?
9. Какие существуют способы крепления полюсов у синхронных машин и в каких случаях они применяются?
10. Как выполняются магнитопроводы ротора синхронных машин и для какой цели проводится их расчет на прочность?
11. Как выполняются магнитопроводы роторов асинхронных машин и машин постоянного тока?
12. Каким образом происходит закрепление в пазах обмотки якоря (ротора)?
13. Какие конструкции коллекторов применяются в машинах постоянного тока?
14. В чем заключается механический расчет коллекторов?
15. Какие виды щеткодержателей применяются в машинах постоянного тока?

Глава двенадцатая

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Каждый день на заводах и НИИ электротехнической промышленности ведется работа по созданию новых и модернизации выпускаемых электрических машин. От интенсивности работ по созданию новой и модернизации старой продукции зависит экономическое положение заводов и НИИ отрасли. Однако большинство инженеров-электромехаников ежедневно значительную часть времени тратят на стандартные расчеты и корректировку чертежей. Системы автоматизированного проектирования электрических машин (САПР ЭМ) призваны освободи-

дить инженеров от рутинной работы, обеспечив большую творческую отдачу инженерных кадров.

В первые годы существования САПР ЭМ считали, что они, в основном, будут применяться при проектировании новых электрических машин. Однако практика показала, что САПР ЭМ лишь частично могут заменить творческие коллективы ученых и инженеров, разрабатывающих новые машины, при этом САПР ЭМ работают в интерактивном режиме. Создание банков данных, машинную графику, пересчет на основе базовой машины других машин серии САПР ЭМ могут взять на себя, и на этом пути может быть получен значительный экономический эффект. Растущие объемы выпуска различных модификаций основного исполнения, наличие мелких серий электрических машин, бесконечные пересчеты и необходимость строжайшей экономии материальных ресурсов оправдывают расходы на САПР ЭМ, хотя каждая ЭВМ требует материальных затрат и увеличивает стоимость выпускаемой продукции [1, 24]. САПР ЭМ необходимы в современном электромашиностроении, но они не заменяют творческие коллективы ученых, инженеров-расчетчиков, конструкторов и технологов. САПР ЭМ дополняют научный потенциал НИИ, заводов отрасли, обеспечивая сокращение сроков создания новых электрических машин и поднимая их технический уровень.

САПР ЭМ будет развиваться как открытая система, т. е. обладать свойством удобства включения новых расчетных методов и технических средств. Тесное взаимодействие человека и ЭВМ в процессе проектирования — основной принцип построения и эксплуатации САПР ЭМ. Монополии человека в творческом начале и принятии основных решений ЭВМ не угрожают, а только расширяют возможности проектировщика.

Применение ЭВМ для проведения расчетов по существующим формулам проектирования началось в конце 50-х годов. Автоматизация расчетов позволила повысить точность и сократить время расчетов. К середине 70-х годов отдельные расчеты стали объединяться в комплексные системы, обеспечивающие выполнение работ от приема заказа до технического проекта и изготовления опытной партии электрических машин.

На современном этапе формирования САПР ЭМ происходит перестройка процесса проектирования, когда многочисленные и разнообразные по содержанию этапы проектирования объединяются в единую систему, в основе которой лежит использование универсальных цифровых ЭВМ. САПР ЭМ влияют на необходимость создания новых математических моделей проектирования, удобных для ЭВМ.

Укрупненная структурная схема САПР ЭМ показана на рис. 12.1.

Современные САПР ЭМ — это организационно-техническая система, состоящая из комплекса средств автоматизации проектирования, взаимосвязанного с коллективом разработчиков электрических ма-

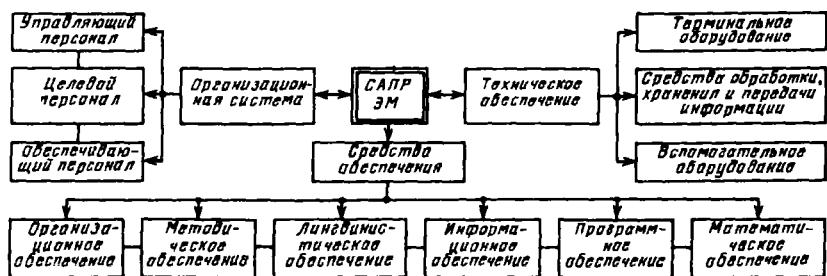


Рис. 12.1. Укрупненная структурная схема САПР

шин (пользователем системы) [28]. САПР ЭМ изменяют не только процесс проектирования, но и облик конструкторского и технологического отделов. Изменяются рабочее место конструктора, помещение для хранения чертежно-конструкторской документации, растет престижность инженера-конструктора. Непосредственная связь ЭВМ со станками и отдельными производственными участками — будущее электромашиностроительных заводов.

Комплекс средств САПР ЭМ, как и комплекс других САПР, состоит из совокупности следующих подсистем и компонентов: методов автоматизированного проектирования электрических машин (математическое обеспечение); технических средств для приема, обработки, хранения и передачи информации (техническое обеспечение); программ, реализующих как проектные процедуры, так и операции по управлению процессом проектирования и техническими средствами (программное обеспечение); информационной базы системы (информационное обеспечение); языков для представления объекта проектирования, для общения пользователя с системой и для программирования (лингвистическое обеспечение); документации, отражающей состав и функционирование средств автоматизированного проектирования (методическое обеспечение); организационной схемы процесса проектирования (организационное обеспечение).

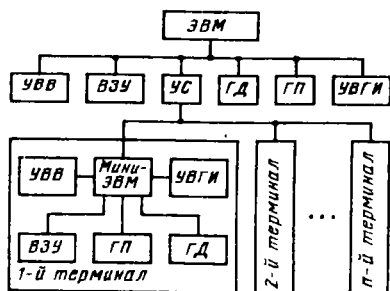
Математическое обеспечение включает совокупность математических моделей и алгоритмов проектирования, представленных в заданной форме.

Техническим обеспечением является совокупность взаимосвязанных технических средств. Это ЭВМ, аппаратура сопряжения с линиями связи, средства отображения и документирования информации, аппаратура взаимодействия проектировщика с ЭВМ и САПР в целом, специальные устройства связи с производственными объектами и др. (рис. 12.2).

Программное обеспечение подразделяется на системное, проблемное и сервисное.

Рис. 12.2. Структура комплекса технических средств САПР:

УВВ – устройство ввода и вывода информации; *ВЗУ* – внешние запоминающие устройства; *УС* – устройство сопряжения; *ГД* – графический дисплей; *ГП* – графопостроитель; *УВГИ* – устройство ввода графической информации



Системное программное обеспечение предназначено для организации работы комплекса средств САПР (включая операционную систему). Проблемное программное обеспечение ориентировано на выполнение определенных проектных процедур (такие программы оформляются обычно в виде пакетов прикладных программ). Сервисное обеспечение осуществляет общение пользователя с системой, редактирование и преобразование формы представления информации.

Информационное обеспечение – совокупность представленных в определенной форме данных. К ним относятся массивы справочно-нормативной и технологической информации, словари системы, отображающие понятийный состав языков, описания заданий и языков управления системы, массивы информации об объекте проектирования. При этом должна применяться единая система классификации и кодирования технико-экономической информации, унифицированная система документации и массивов данных об объекте проектирования.

Под лингвистическим обеспечением понимается совокупность языков проектирования, включая термины и определения, правила формализации естественного языка предметной области проектирования и методы сжатия и развертывания текстов. В настоящее время сложились три группы языков: языки программирования, языки описания объекта проектирования и языки управления проектированием.

К методическому обеспечению относят документы, в которых отражены состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизации проектирования.

В организационное обеспечение входят документы, устанавливающие перечень участвующих в проектировании подразделений, их функции и связи между ними, а также устанавливающие форму представления результатов проектирования и порядок рассмотрения проектных документов.

Разработка САПР ЭМ в полном объеме занимает продолжительное время, поэтому целесообразно вводить в эксплуатацию части системы по мере их готовности. Введенный в эксплуатацию базовый вариант системы в дальнейшем расширяется. Постоянный прогресс электрома-

шиностроения, вычислительной техники и вычислительной математики приводят к появлению новых, более совершенных математических моделей и программ, которые должны заменять старые, менее удачные аналоги.

Эффективность работы САПР ЭМ существенно зависит от структуры и организации комплекса технических средств (рис. 12.2). Для обеспечения эффективности автоматизированного проектирования предусматривается возможность использования проектировщиком различных режимов работы ЭВМ. Такими режимами являются пакетная обработка, режим разделения времени, режим реального масштаба времени.

При пакетной обработке решение задач ведется по жестким алгоритмам автоматически, без вмешательства проектировщика. При этом оператором ЭВМ формируются такие пакеты задач, которые обеспечивают достаточно полное использование ресурсов ЭВМ.

В режиме разделения времени с ЭВМ одновременно взаимодействуют несколько пользователей (каждый со своего терминала), занятых отладкой программ, вводом данных, формированием или корректировкой модели объекта проектирования и т. д. При этом ЭВМ по очереди представляет каждому пользователю необходимые ресурсы, так что создается иллюзия монопольного владения машиной.

В режиме реального масштаба времени ЭВМ управляет технологическим оборудованием, специальными устройствами ввода и документированием графической информации, обеспечивает оперативный диалог проектировщика с ЭВМ, что важно при решении не полностью формализованных проектных задач.

САПР ЭМ строится на базе больших и малых ЭВМ по иерархическому принципу. В состав комплекса технических средств входят центральный вычислительный комплекс, средства взаимодействия проектировщика с системой, средства документирования, средства передачи данных.

Ядром технических средств САПР ЭМ являются ЭВМ. Наибольшее распространение в СССР имеют ЭВМ Единой системы (ЕС ЭВМ), разработанные по программе "Ряд-2". Разрабатываются ЭВМ по программе "Ряд-3", многопроцессорные вычислительные комплексы "Эльбрус-1" и "Эльбрус-2", имеющие производительность от 1,5 до 10 млн. оп./с для системы "Эльбрус-1" и от 10–15 до 100 млн. оп./с для системы "Эльбрус-2".

Важной особенностью ЭВМ является наличие развитых программных и аппаратных средств диагностики и восстановления. Последние позволяют продолжать или восстанавливать вычислительный процесс при возникновении сбоя.

В САПР широко используются мини-ЭВМ для построения мощных многоцелевых интеллектуальных терминалов проектировщиков, а также в качестве базовой ЭВМ комплекса технических средств не-

больших САПР и систем графического взаимодействия. Данный класс машин представлен системой мини-ЭВМ СМ ЭВМ.

МикроЭВМ в САПР используются для внешнего управления устройствами отображения, ввода и вывода графической информации. В последнее время стали разрабатываться и применяться в САПР терминалы, предназначенные для решения группы однородных задач. Например, задач документирования или задач ввода и редактирования графической информации, в которых в качестве управляющей ЭВМ достаточно использовать микроЭВМ.

В качестве встроенных блоков управления устройствами комплекса технических средств САПР (графическим дисплеем, графопостроителем, устройством ввода графической информации и др.) используются микропроцессоры.

Для обеспечения пакетного режима работы ЭВМ достаточно иметь следующий набор периферийных устройств: устройства подготовки данных, устройства ввода-вывода с перфокарт и перфолент, алфавитно-цифровое печатающее устройство (АЦПУ) для вывода результатов. Диалоговый режим реализуется, если в составе технических средств имеются специальные устройства для обеспечения диалога человека с ЭВМ. Прежде всего к ним относятся дисплеи. Различают дисплеи алфавитно-цифровые и графические. Если в диалоговом режиме обмен информацией осуществляется только короткими фразами, вместо дисплея можно применять пультовую пишущую машинку типа "Консул-260". Для получения чертежей в требуемой форме используются устройства вывода графической информации — чертежные автоматы, а также устройства ввода сложных графических построений в ЭВМ и устройства кодирования графической информации. В качестве внешних устройств ЕС ЭВМ выпускаются следующие чертежные автоматы.

Графопостроитель ЕС-7051 планшетного типа с рабочим полем 1000 x 1050 мм. Максимальная скорость вычерчивания 50 мм/с. Устройство осуществляет прием графических данных через буферную память и выполняет линейную и круговую интерполяцию, имеет три пишущих элемента.

Графопостроитель ЕС-7052 барабанного типа с рабочим полем 390 x x 600 мм. Максимальная скорость вычерчивания 200 м/с. Устройство не имеет буферной памяти и выполняет только линейную интерполяцию, снабжено тремя пишущими элементами.

Графопостроитель ЕС-7053 барабанного типа с рабочим полем 841 x x 1600 мм. Максимальная скорость вычерчивания 150 мм/с. Устройство осуществляет прием графических данных в буферную память и выполняет линейную и круговую интерполяцию, имеет три пишущих элементов.

Графопостроитель ЕС-7054 планшетного типа с рабочим полем 1600 x x 1200 мм (модель 1612) или 1000 x 800 мм (модель 1008). Макси-

мальная скорость вычерчивания 50 (модель 1612) или 100 мм/с (модель 1008). Выполняет линейную и круговую интерполяцию. Модель 1612 имеет четыре пишущих элемента, модель 1008 — два.

В графическом дисплее ЕС-7064 графическая и алфавитно-цифровая информации на экране электронно-лучевой трубки формируются с помощью электронного луча, развертка которого производится генераторами векторов и знаков дисплея под управления программы графических команд.

Дисплей снабжен световым пером, алфавитно-цифровой и функциональной клавиатурой. Он имеет развитую систему канальных команд, обеспечивающих двусторонний обмен информацией между буферной памятью ЭВМ, средства управления курсором для редактирования текста на экране, средства считывания информации о координатах точки обнаружения световым пером или номера нажатой клавиши функциональной клавиатуры и т. д.

Периферийные устройства, обеспечивающие пакетный и диалоговый режим работы САПР, объединяют в комплекс оборудования, называемый автоматизированным рабочим местом проектировщика (АРМ).

Для решения задач электромашиностроения наиболее целесообразным является использование АРМ-М — автоматизированного рабочего места конструктора машиностроительных изделий.

В состав АРМ-М входят следующие устройства: мини-ЭВМ, графопостроитель планшетного типа, графический дисплей, текстовый дисплей, кодировщик графической информации, накопитель на магнитных дисках, накопитель на магнитных лентах, фотосчитывающее устройство с перфоленты, устройство вывода на перфоленту, устройство ввода с перфокарт, алфавитно-цифровое печатающее устройство, пишущая машинка и устройство сопряжения мини-ЭВМ с центральной ЭВМ.

АРМ-М удобно и целесообразно использовать в качестве удаленного терминала. Наличие в его составе мини-ЭВМ позволяет осуществлять работу в автономном режиме, а также разгружать центральный процессор и канал связи. Эти устройства дают возможность создавать многоуровневые системы автоматизированного проектирования.

В составе АРМ-М предусмотрен полуавтомат кодирования графической информации (ПКГИ-0) с разрешающей способностью 0,1 мм. Кодировщик предназначен для получения базы графических данных путем описания отдельных элементов чертежа, формирования графических объектов из совокупности таких элементов и синтеза новых объектов.

Большинство задач проектирования электрических машин сочетает в себе необходимость выполнения как вычислений, так и процедур графического характера. Основные затраты времени конструктора идут не на то, чтобы выбрать принципиальное решение, четко вырисовываемое в его воображении, а на то, чтобы перенести мысленный

образ на бумагу с соблюдением всех правил машиностроительного черчения. Предполагается, что в будущем роль чертежей в процессе проектирования и производства, содержание и форма конструкторской документации должны претерпеть существенные изменения. Результатом применения САПР ЭМ все в большей мере будут программы управления технологическим оборудованием, представленные на машинных носителях. Однако в настоящее время и в ближайшем будущем роль чертежей и других графических документов в процессе подготовки производства электрических машин остается важной.

В основе программного обеспечения лежит модульный принцип. Преимущества модульного программирования заключаются в том, что составление программы сводится к синтезу ее из модулей, причем последние можно считать элементами проблемно-ориентированного языка. Модули имеют тенденцию к унификации, т. е. один модуль может использоваться для нескольких программ и они могут формироваться и отлаживаться независимо друг от друга разными программистами, в разных системах программирования. Отладка программ упрощается тем, что в момент объединения модулей каждый из них уже отлажен. Благодаря модульной структуре программа может быть легко изменена путем создания новых модулей, или преобразования некоторых из уже имеющихся, или перестановки модулей, определяющих процесс обработки данных.

Модульная структура программ облегчает организацию работы больших коллективов программистов и эксплуатацию программ.

Общее (системное) программное обеспечение в САПР представляет собой операционную систему (ОС) (рис. 12.3).

Среди языков программирования САПР ЭМ различают машинные, проблемно-ориентированные и машинно-ориентированные. Языки АЛГОЛ-60, ФОРТРАН, ПЛ-1 ориентированы на описание инженерных и научных задач, т. е. задач, при решении которых преобладают операции численного анализа. Машинно-ориентированные языки отражают структуру ЭВМ, особенности ее системы команд и занимают промежуточное положение между машинным языком и проблемно-ориентированными языками.

К отдельной группе языков программирования относятся языки обработки списков (ПАСКАЛЬ). Языки обработки списков эффективны при решении вычислительных задач.

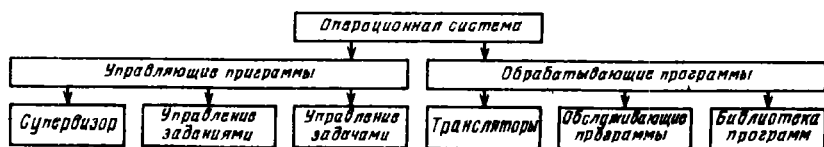


Рис. 12.3. Структура общего программного обеспечения САПР

Для общения пользователя САПР ЭМ с ЭВМ используются диалоговые языки.

В одних случаях применяются диалоговые системы, созданные в виде разговорных языков относительно общего применения (АПЛ, БЭЙСИК и др.), в других – в виде узкоспециализированных систем, имеющих резко выраженную проблемную ориентацию. БЕЙСИК является основным языком программирования миллионов персональных ЭВМ, появившихся в последнее время. Изучив БЭЙСИК, пользователь может сразу приступить к его применению для решения своих задач. Кроме того, по языку БЭЙСИК имеется большое количество программной информации. Используются также ограниченные языки общения, которые получены путем добавления к пакетным языкам программирования ФОРТРАН, АЛГОЛ и др. соответствующих средств ведения диалога.

Языки программирования геометрических объектов (графические языки) развиваются в двух направлениях. Первое, более распространенное направление заключается в создании на одном из процедурных языков программирования набора графических подпрограмм. Совокупность обращений к этим подпрограммам условно квалифицируется как графический язык, являющийся расширением исходного языка геометрическими переменными и операциями. Такой подход удобен тем, что его применение не сопряжено с изменением синтаксиса исходного языка, при этом легко сочетаются действия над графическими изображениями и решения вычислительных задач. К недостаткам метода относится некоторое усложнение операторов вызова графических подпрограмм. Второе направление характеризуется созданием специальных графических языков, предусматривающих естественное описание графических изображений и действий, производимых над элементами изображения. Программа на графическом языке преобразуется транслятором в систему команд на одном из универсальных языков, а затем – в систему команд ЭВМ. Такая схема позволяет включать программы, написанные на графическом языке, в программы, составленные на универсальном языке. Недостатком является увеличение времени трансляции.

Большинство прикладных графических систем реализовано на одном из графических пакетов, ориентированных на различные типы технического обеспечения: ГП-ЕС ЭВМ, ГРАФОР, РАД-ЕС, СМОГ, АЛГРАФ, ГРАФИКА и др. для ЕС ЭВМ и БПО МГ АРМ-С, ДИФОР, ОС ГРАФ, ГРИФ и др. для СМ ЭВМ. В целях унификации программного обеспечения в настоящее время приняты стандарты на базовое программное обеспечение машинной графики: COE, разработанный в Ассоциации по вычислительной технике (США), и GKS, разработанный институтом стандартов ФРГ (DIN), принятый в качестве международного стандарта. В стандарте GKS создан ряд отечественных графических пакетов: ГРАФ – СМ/ГКС, ГКС – МЭИ, DISCORE, функционирующих в

составе комплексов АРМ на ЭВМ типа СМ и позволяющих создавать интерактивные прикладные графические системы для обработки чертежей.

Информация о геометрии детали может быть получена различными способами в зависимости от организации геометрических данных в подсистеме машинной графики САПР ЭМ. Существуют два способа хранения геометрических данных: ориентация на изделие (трехмерная модель), ориентация на чертеж (двухмерная модель). В случае ориентации системы на изделие необходимо иметь программы геометрического процессора системы, осуществляющие преобразование данных трехмерной модели объекта в двухмерные отображения в виде стандартных проекций, сечений, разрезов. Когда в системе принята ориентация на чертеж, то данные об объекте проектирования хранятся в таком виде, который требуется для получения конструкторского документа. Если проектируются машины, имеющие аналоги или состоящие из типовых, унифицированных элементов, целесообразно строить систему, ориентированную на чертеж. Если же проектируются изделия, не имеющие аналогов или слабо поддающиеся унификации, желательно использовать принцип ориентации на изделие.

Массовому пользователю в настоящее время доступны пакеты прикладных программ систем геометрического моделирования в пространстве, функционирующие на ЕС ЭВМ: ФАП-КФ, SPACE в системе СМОГ-85, СПИЧ, позволяющие разрабатывать системы моделирования на языке ФОРТРАН. Недостатком использования этих пакетов является сложность организации графического диалога. Они могут использоваться в рамках САПР для решения геометрических задач, не требующих активного графического диалога, с использованием для ввода данных алфавитно-цифрового дисплея, а для вывода графопостроителя.

Обеспечение эффективного интерактивного взаимодействия при автоматизированном конструировании может быть достигнуто при использовании трехмерных систем геометрического моделирования совместно с двухмерными пакетами.

Информационное обеспечение САПР включает в себя информационный язык, справочно-информационный фонд, систему кодирования, терминальный словарь (тезаурус), средства управления базой данных (СУБД). Наиболее передовой формой организации средств управления являются банки данных. Существуют четыре уровня описания информационного процесса в САПР: информационная модель данных (ИМД), модель доступа к данным, модель внутреннего кодирования информации, модель физической организации памяти.

Два первых уровня определяют интерфейс проектировщика с САПР и функциональные возможности информационного обеспечения САПР.

На СУБД возлагается организация и поддержание данных САПР в соответствии с ИМД, обеспечение интерфейса между модулями программного обеспечения и данными информационной базы, поиск дан-

ных в справочно-информационном фонде, защита данных от несанкционированного доступа и разрушений, обеспечение доступа как к самим данным, так и к их описаниям непосредственно на уровне ИМД, осуществление сбора статистики по использованию и доступу к единицам информации.

В последние десятилетия новые поколения ЭВМ создавались примерно с такой же периодичностью, что и единые серии электрических машин общего назначения. Пока создавался данный учебник, сменилось три поколения ЭВМ, поэтому читателю надо быть готовым к новым техническим средствам САПР. Однако принципиально они будут похожи на описанные в этой книге.

Персональные ЭВМ революционизируют процесс проектирования. Они возьмут на себя не менее 30–40% рабочего времени инженера и позволят повысить качество проектирования при меньших затратах времени.

Средства автоматизации проектирования непрерывно совершенствуются, обеспечивая при хозрасчете применение САПР ЭМ и отдельных ее подсистем на всех электромашиностроительных заводах.

Наибольшие достижения в создании САПР ЭМ достигнуты при создании САПР асинхронных двигателей (САПР АД).

Система позволяет определять оптимальные размеры активной части машины, удовлетворяющие техническим и технологическим требованиям, выдавать отдельные чертежи конструкции (общий вид, узлы и детали) на графопостроитель, корректировать конструкторско-технологическую документацию в процессе разработки и серийного производства с минимальным использованием ручных работ. С помощью подсистемы оптимизационного расчетного проектирования, исходя из технического задания и критериев оценки технико-экономических показателей разрабатываемых двигателей, осуществляется определение оптимальных электромагнитных характеристик и геометрических размеров активной части машины. Подсистема расчетного проектирования используется также при разработке многочисленных модификаций двигателей [1, 24].

При расчете двигателя используются 100 исходных данных. Часть из них предопределена требованиями эксплуатации, материалами, используемыми в производстве, опытом проектирования предшествующих серий. Другая часть исходных данных устанавливается на основании предварительных исследований. К ним относятся выбор класса нагревостойкости изоляции, степени унификации различных исполнений и др.

Задача оптимального расчетного проектирования является многокритериальной. В качестве основного критерия принимается критерий минимума суммарных затрат, учитывающий стоимость изготовления двигателя и расходы на его эксплуатацию. Кроме поиска оптимальных параметров машины по основному критерию осуществляется так-

же дополнительный поиск по минимуму размеров сердечника статора. Возможно использование и других критериев: максимума полезной мощности, минимальной стоимости машины, минимума массы и др.

В математической модели асинхронного двигателя предусмотрены два вида ограничений: ограничения, вытекающие из требований стандартов (допустимые значения пускового и максимального моментов, пускового тока, температуры обмотки) и требований надежности (скорости нарастания температуры в режиме короткого замыкания); связь лимитеров с конструктивными и технологическими требованиями — минимальной шириной зубца, высотой ярма статора и т. д.

Узлы и детали всех двигателей, входящих в отрезки серии (группы смежных высот осей вращения), как правило, имеют геометрически подобные формы. Некоторые детали являются подобными для всех машин серии. Характерна также широкая унификация узлов, деталей, материалов в пределах одной высоты оси вращения, а по некоторым элементам — и в пределах ряда высот. Это позволяет обобщить геометрию конструкции, другими словами, создать ее математическую модель. Модель дает возможность по размерам активной части машины вычислять размеры сборочных единиц и отдельных деталей асинхронного двигателя.

Проектировщик, работая с ЭВМ, может производить работу в одном из следующих режимов: генерация математической модели, оптимизация параметров в автоматическом режиме, оптимизация параметров в режиме диалога, конструирование в режиме диалога, вывод графической информации на графопостроитель, корректировка чертежей в производстве, представление по запросам конструкторской и технологической информации.

Структурная схема САПР АД представлена на рис. 12.4.

САПР ЭМ большой мощности имеют свои особенности, связанные с мелкосерийностью и значительным изменением конструкций при изменении системы охлаждения. Для различных типов машин большой мощности созданы специализированные программы электромагнитных расчетов, в частности для приближенного расчета магнитного поля турбогенератора, работающего в сложных режимах, используется подробная схема замещения магнитной цепи. При расчете магнитного поля машин постоянного тока, где требуется точный учет геометрии магнитопровода, применяется метод конечных элементов. Метод конечных разностей с расчетной сеткой в полярных координатах оказался наиболее удобным для расчета магнитного поля в активной зоне турбогенератора при внутренних внезапных коротких замыканиях. Для расчета трехмерного электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора с учетом вихревых токов применяется прямое решение уравнений Максвелла с расчетной сеткой в цилиндрической системе координат. Для машин с криогенным охлаждением широко используются методы определения полей с помощью скалярного магнитного потенциала [9].

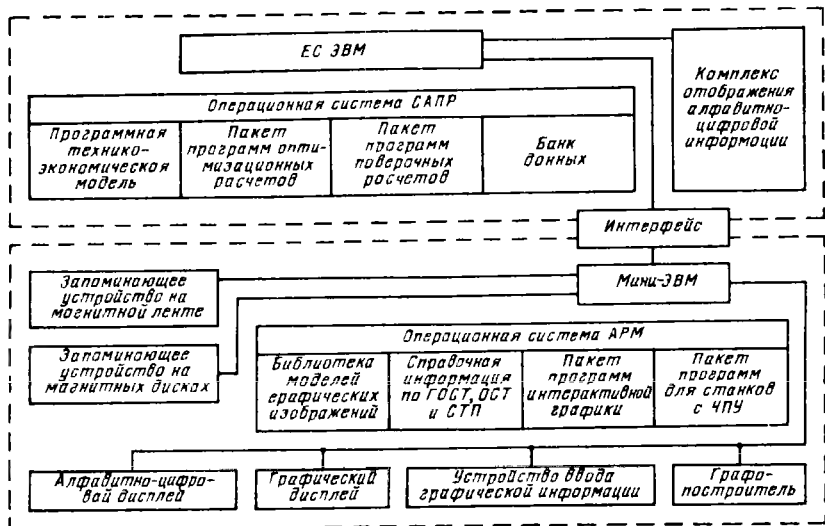


Рис. 12.4. Структурная схема САПР АД

В целях повышения степени использования активных материалов машин значительно усовершенствованы методики тепловых расчетов, в первую очередь расчетов нестационарных температурных полей в непрерывных контурах циркуляции теплоносителей, развиты численные методы решения пространственных нелинейных задач теплопроводности с определением полей вектора теплового потока.

Для механических расчетов дисковых якорей машин постоянного тока создан комплекс программ решения плоской задачи теории упругости для многосвязанных областей с циклической симметрией и программ оптимального проектирования осесимметричных упругих тел с полостями.

Основная часть экономии от внедрения САПР крупных электрических машин определяется сокращением эксплуатационных издержек потребителя в результате ускорения ввода машин в эксплуатацию, снижением расходов на ликвидацию последствий аварий, удлинением межремонтных периодов.

Разрабатываются САПР, предназначенные для микромашин различных типов [18]. Прикладное математическое обеспечение состоит из ряда инвариантных и функциональных модулей. При решении конкретной задачи проектирования используется определенный набор модулей. Моделируются беспазовые, неявнополюсные магнитопроводы, все виды пазов и полюсов электрических машин малой мощности. При этом есть возможность исследовать влияние конфигурации элементов на характеристики и автоматизировать вычерчивание сложных изображений

на средствах машинной графики. Реализуется на ЭВМ моделирование обмоток, как произвольных, так и типовых. При этом используется инвариантный модуль, описывающий распределение витков токовых слоев, числа витков в секциях и схему соединения с определенным набором признаков, необходимых для вычерчивания схемы обмотки на чертежном автомате, в сочетании с набором сервисных модулей, преобразующих привычные способы задания обмоток через словесные понятия в наборы данных для инвариантного модуля.

Для проектирования специальных электрических машин создается САПР СЭМ. К специальным электрическим машинам, работающим в различных автономных электроэнергетических системах, предъявляются дополнительные требования по шумам и вибрациям, условиям охлаждения, массогабаритным показателям и т. п.

Структура САПР СЭМ представлена на рис. 12.5.

Особенностью САПР СЭМ является введение в систему этапа разработки конструктивной схемы электроагрегата, основным элементом которой является электрическая машина.

Специальные электрические машины предназначены для использования в электроагрегатах или сами могут формировать электроагрегат. В связи с этим проектирование машины должно производиться комплексно с приводным или исполнительным механизмом (турбина,

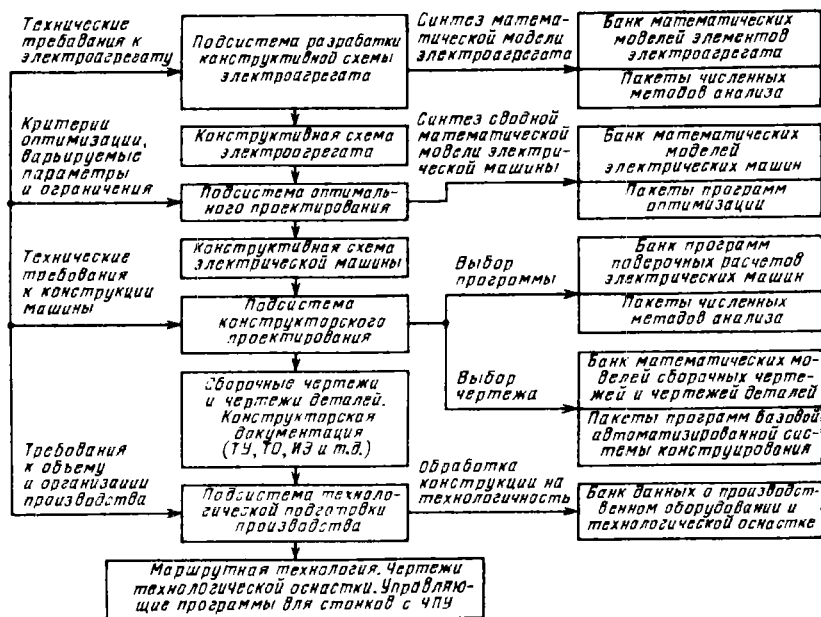


Рис. 12.5. Структурная схема САПР СЭМ

электронасос и др.). Это означает, что выбор их основных параметров (мощности, частоты вращения, массогабаритных показателей, системы охлаждения и т. д.) должен производиться на основании общей оценки. Так, в основу выбора конструктивной схемы маломощного электромашинного преобразователя положен комплексный подход к объединению двигателя и генератора в одном корпусе, исключение резонансов конструкции с основными вибровозмущающими силами, композиционная обработка конструкций, уменьшающая влияние производственно-технологических факторов, т. е. разрабатывается методология обеспечения маломощности конструкции.

Алгоритм разработки конструктивной схемы включает в себя взаимозависимый выбор размеров электромагнитного ядра электрической машины на основе технических требований, затем по результатам предварительных электромагнитных расчетов определяются размеры ротора. После чего в диалоговом режиме по выбранным критериям происходит корректировка размеров ротора. Аналогично происходит выбор размеров корпуса, но уже по своим критериям, и, наконец, выбор подшипниковых узлов.

В результате операций создается конструктивная схема электрической машины. Математическая модель конструктивной схемы не содержит подробной проработки каждой сборочной единицы по их конфигурации и уточненным размерам, а ограничивается лишь упрощенными формами, наиболее характерными для общего построения данного исполнения машины.

Основу подсистемы оптимального проектирования определяет сводная математическая модель, состоящая из следующих расчетов: электромагнитного, размеров конструктивной схемы, теплового, механического, виброакустического.

Математическая модель электромагнитного расчета включает в себя расчеты магнитной цепи, холостого хода, номинального и пускового режимов. Тепловой расчет определяет превышения температуры различных частей машины. Математическая модель расчета виброакустических характеристик предусматривает расчет магнитных и подшипниковых шумов и вибраций, а также вентиляционного шума. Механический расчет узла вал-подшипники обеспечивает расчеты вала и выбор подшипников качения.

Одновременно могут варьироваться не более 15 параметров. Эти параметры для каждого конкретного расчета выбираются из общего списка варьируемых параметров, в число которых могут входить размеры сердечников статора и ротора, индукция в воздушном зазоре, размеры станины и шитов и т. д.

В подсистеме оптимального проектирования предусмотрены признаки, указывающие на марки используемых материалов, варианты фрагментов конструкций электрических машин (например, фрагменты

сборочных единиц, формы частей паза) и т. п. Эти признаки определяют выбор расчетных формул в математических моделях.

В качестве ограничений в подсистеме оптимального проектирования выбираются требования стандартов (допустимые значения кратности начального пускового и максимального моментов, превышение температуры обмотки статора, долговечность подшипников, запас прочности вала и т. д.). Кроме того, в этой подсистеме предусмотрены ограничения конструкторского и технологического характера (ширина верха и низа зуба статора, высота спинки статора, расстояние от лобовой части обмотки до щита).

Поиск оптимального варианта проводится по нескольким критериям в режиме диалога конструктора с ЭВМ. Эти критерии выбираются из списка критериев. Список критериев включает массу машины, момент инерции ротора, общий уровень звуковой мощности, интегральный критерий по виброускорениям, КПД и т. д.

Подсистема оптимального проектирования позволяет уточнить размеры активной части и параметров машины в первоначально полученной конструктивной схеме и сделать ее основой для разработки общего вида электрической машины, т. е. перейти таким образом к подсистеме конструирования.

Подсистема конструкторского проектирования предусматривает выпуск чертежей общего вида сборочных единиц и деталей, а также текстовой конструкторской документации.

Структурная схема подсистемы конструкторского проектирования приведена на рис. 12.6.

Разработки общего вида машины ведется на основе конструктивной схемы с использованием типовых фрагментов сборочных единиц и интерактивной графики. Конструктивная схема является основой, на которой формируется общий вид путем добавления отдельных фрагментов сборочных единиц.

Разработка чертежей сборочных единиц и деталей проводится на основе общего вида с использованием типовых фрагментов деталей.

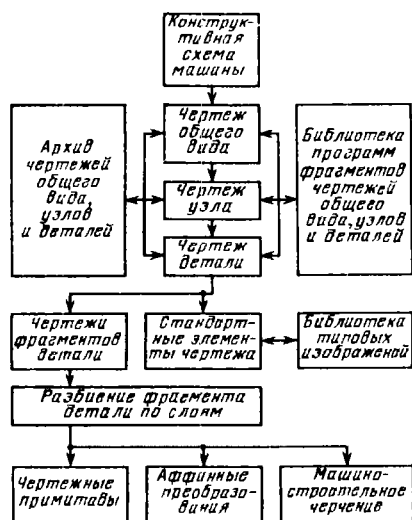


Рис. 12.6. Структурная схема подсистемы конструкторского проектирования

В САПР СЭМ предусматривается разработка обширной библиотеки фрагментов сборочных единиц и деталей. Каждый из фрагментов имеет свою математическую модель. Изменяя входные (параметры) модели, можно получить фрагменты с необходимыми размерами. Библиотека фрагментов сборочных единиц и деталей позволяет конструктору значительно повысить производительность труда и сократить сроки разработки чертежей. Этот этап работы обеспечивается пакетом графических подпрограмм функционального уровня и программой, связывающей параметры чертежа конструктивной схемы с координатами характерных графических точек, необходимых для функционирования графических программ.

Математическое обеспечение используемых при проектировании ЭВМ позволяет по-разному построить графические программы выполнения узлов и деталей электрической машины.

Разработка математической модели сборочных единиц целесообразна только в тех случаях, когда сборочная единица для ряда машин является универсальной, т. е. находит применение при разработке типов электрических машин. К таким сборочным единицам относятся активные части электрической машины: статор обмотанный и необмотанный машин переменного тока, короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя и т. д.

В процессе создания САПР СЭМ разработаны математические модели чертежей активной части машин переменного тока. Исходными данными для выпуска чертежей активной части являются результаты электромагнитного расчета.

Программы черчения фрагментов сборочных единиц и деталей строятся с использованием интерактивной графической системы. Для программирования фрагмента необходимо задать положение базовой системы координат сборочной единицы или детали, а также описать элементы чертежа фрагмента. Чертеж фрагмента детали задается в базовой системе координат, т. е. относительно такой системы координат, которая определяет положение детали относительно других деталей при ее работе в электрической машине. При составлении сборочного чертежа сопрягаются системы координат деталей друг с другом. За оси координат принимаются осевые линии отверстий и валов, оси симметрии и т. п. Например, одна ось координат подшипникового щита проходит вдоль оси вращения машины, а другая — по поверхности замка, так как поверхность замка служит измерительной и сборочной базой подшипникового щита.

Для описания чертежа фрагмента используются чертежные примитивы — прямые линии, точки, дуги. Кроме того, при программировании фрагментов широко используются команды аффинного преобразования, которые позволяют переместить какой-либо фрагмент, повернуть его на некоторый угол, изобразить его в увеличенном или уменьшенном масштабе, построить новый элемент, симметричный данному.

В состав подсистемы технологической подготовки производства электрических машин должны входить следующие пакеты прикладных программ (ППП):

- обеспечения технологичности конструкции, позволяющие анализировать технологические возможности производства;

- проектирования технологических процессов изготовления машины и подготовки управляющих программ для оборудования с ЧПУ: токарных, фрезерных и электроэрозионных станков;

- конструирование средств технологического оснащения для производства специального мерительного (скобы, пробки, штихмассы) и режущего (сверла, фрезы) инструмента, а также вырубных и гибочных штампов.

Пакеты прикладных программ (ППП) технологической подготовки производства должны обеспечивать:

- ввод исходных данных непосредственно с конструкторских и технических документов;

- визуальный, по возможности графический контроль исходных данных;

- корректировку исходных данных и справочной информации в режиме диалога;

- автоматический вывод на графические устройства чертежей технологической оснастки;

- проведение необходимых конструкторских и технологических расчетов.

Математические модели технологической подготовки производства должны разрабатываться на единой методологической основе с максимальным использованием унифицированных, типовых и стандартных решений с учетом принципа единства информационного и лингвистического обеспечений.

Математические модели технологической подготовки производства должны включать формализованное описание:

- конструкторской и технологической документации;

- типовых технологических процессов;

- средств технологической оснастки и технологического оборудования;

- нормативно-справочных материалов.

В настоящее время имеются десятки САПР ЭМ, которые, к сожалению, не связаны между собой. Одной из важных проблем является их координация. Существующее положение можно считать первым этапом создания САПР ЭМ. В последующем отдельные САПР ЭМ будут объединяться в единую общесоюзную систему с общим банком данных. Этот процесс, по-видимому, займет не один десяток лет.

Проектирование и конструирование электрических машин переживают революционные изменения, и будущие книги по проектированию

электрических машин должны будут воплотить все успехи в электромашиностроении и новейшие достижения в вычислительной технике [15].

Контрольные вопросы

1. Как Вы представляете САПР электрических машин в настоящее время и в будущем?
2. Что входит в комплекс средств САПР ЭМ?
3. Какие вычислительные средства могут входить в САПР ЭМ?
4. Как выглядит современное рабочее место конструктора?
5. Как Вы понимаете критерий минимума суммарных затрат? Какие еще могут быть критерии оптимизации?
6. Архитектура САПР специальных электрических машин.
7. Математические модели электромагнитных расчетов и конструктивного выполнения электрических машин.

Приложение 1

КРИВЫЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ

В связи с некоторым расхождением магнитных характеристик электротехнических сталей одинаковых марок, выпускаемых различными предприятиями, в табл. П1.1–П1.17 приводятся усредненные цифры, которые могут быть использованы при учебном проектировании. Для расчетов двигателей для производственных целей рекомендуется пользоваться уточненными кривыми намагничивания конкретной стали, которую предполагается применить для проектируемого двигателя.

Таблица П1.1. Листовая электротехническая сталь марок 1211, 1212, 1311 (слабо- и среднелегированная)

В, Тл	H, А/м									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	140	143	146	149	152	153	158	161	164	167
0,5	171	175	179	183	187	191	195	199	203	207
0,6	211	216	221	226	231	236	241	246	251	256
0,7	261	266	271	276	281	287	293	299	306	312
0,8	318	324	330	337	344	352	360	369	378	387
0,9	397	407	417	427	437	447	458	469	480	491
1	502	514	527	541	555	570	585	600	615	631
1,1	647	664	682	701	720	739	859	779	800	821
1,2	843	866	891	918	946	976	1010	1040	1070	1100
1,3	1140	1180	1220	1260	1300	1340	1380	1430	1480	1530
1,4	1580	1640	1710	1780	1860	1950	2050	2150	2260	2380
1,5	2500	2640	2790	2950	3110	3280	3460	3660	3880	4120
1,6	4370	4630	4910	5220	5530	5880	6230	6600	6980	7370
1,7	7780	8200	8630	9070	9630	10100	10600	11100	11600	12200
1,8	12800	13400	14200	14600	15200	15900	16600	17300	18000	18800
1,9	19700	20600	21600	22600	23600	24600	25600	26800	28200	29600
2	31000	32500	34300	36500	39000	42000	45500	49500	54500	59500
2,1	65500	72500	80000	88000	96000	104000	112000	120000	128000	136000
2,2	144000	152000	160000	168000	176000	184000	192000	200000	208000	216000
2,3	224000	232000	240000	248000	256000	264000	272000	280000	288000	296000
2,4	304000	312000	320000	328000	336000	344000	352000	360000	368000	376000
2,5	384000	392000	400000	408000	416000	424000	432000	440000	448000	456000

Таблица П1.2. Листовая электротехническая сталь марок 1411, 1412, 1413 (повышеннолегированная)

В, Тр.	Н, А/м										
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	
0,2	44	45	47	48	49	50	51	52	54	55	
0,3	56	57	58	59	60	61	63	64	65	66	
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89	
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107	
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130	
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162	
0,9	166	170	174	179	184	189	194	199	205	211	
1	217	223	230	237	241	252	260	269	278	288	
1,1	298	309	320	332	345	359	374	390	407	425	
1,2	444	465	487	510	535	562	590	620	652	686	
1,3	722	760	800	850	900	960	1030	1110	1200	1300	
1,4	1410	1530	1660	1810	1970	2140	2320	2510	2710	2920	
1,5	3140	3370	3610	3870	4140	4420	4710	5010	5320	5640	
1,6	5980	6330	6700	7090	7500	7930	8380	8850	9340	9860	
1,7	10100	11000	11600	12300	13000	13700	14500	15300	16200	17100	
1,8	18100	19100	20200	21400	22700	24100	25600	27200	29000	31100	
1,9	33500	36300	39700	43700	48300	53700	59700	66200	73200	80600	
2	88300	96100	104000	112000	120000	128000	136000	144000	151000	159000	
2,1	167000	175000	183000	191000	199000	207000	215000	223000	231000	239000	
2,2	246000	254000	262000	270000	278000	286000	294000	302000	310000	318000	
2,3	326000	334000	342000	350000	358000	365000	373000	381000	389000	397000	
2,4	405000	413000	421000	429000	437000	445000	—	—	—	—	

Таблица П1.3. Листовая электротехническая сталь марок 1511, 1512, 1513 (высоколегированная)

В, Тл	H, А/м										
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	
0,4	96	97	98	99	100	102	104	106	108	111	
0,5	114	117	120	123	126	129	132	136	140	144	
0,6	148	152	156	160	164	168	172	177	182	187	
0,7	192	197	202	208	214	220	226	233	240	247	
0,8	254	261	268	275	282	289	296	303	310	317	
0,9	325	333	341	349	358	367	376	385	394	404	
1	414	424	435	446	458	470	483	496	510	524	
1,1	538	553	569	586	604	623	643	664	685	707	
1,2	730	754	780	810	840	870	900	940	980	1030	
1,3	1080	1140	1200	1270	1340	1410	1490	1590	1600	1720	
1,4	1940	2060	2200	2340	2500	2700	2920	3140	3370	3600	
1,5	3850	4060	4290	4520	4760	5000	5300	5650	6000	6350	
1,6	6700	7100	7600	8100	8650	9300	10 000	10 700	11 400	12 200	
1,7	13 000	14 000	15 000	16 000	17 000	18 000	19 000	20 000	21 000	22 000	
1,8	23 000	24 000	25 000	26 000	27 000	28 000	29 000	30 000	31 200	32 500	
1,9	34 000	35 500	37 000	38 500	40 500	42 500	45 000	51 000	57 000	63 000	
2	70 000	77 000	84 500	92 000	100 000	108 000	116 000	124 000	138 000	140 000	
2,1	148 000	156 000	164 000	172 000	180 000	188 000	196 000	204 000	212 000	220 000	
2,2	228 000	236 000	244 000	252 000	260 000	268 000	276 000	284 000	292 000	300 000	

При мечании. Для индукции свыше 2,06 Тл кривая намагничивания выражается уравнением $B = 1,9140 + 1,256H \cdot 10^{-6}$.

Таблица П1.4. Листовая электротехническая сталь (холоднокатаная) марки 3413

В, Тл	H, А/м									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,6	81	83	85	87	89	91	93	95	97	99
0,7	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128
0,8	130	132	134	136	138	140	142	144	146	149
0,9	152	155	158	161	164	167	170	173	176	179
1	182	185	188	192	195	198	201	204	207	210
1,1	213	216	219	222	225	228	231	234	237	240
1,2	243	246	249	252	255	258	261	264	267	271
1,3	275	279	283	287	291	295	300	305	310	315
1,4	320	326	332	338	344	350	358	366	374	382
1,5	390	402	414	426	438	450	464	478	492	506
1,6	520	544	566	588	610	632	665	698	732	766
1,7	800	840	890	940	990	1040	1132	1224	1316	1408
1,8	1500	1542	1700	1922	2144	2366	2588	2820	3080	3450
1,9	3825	4200	4600	5200	5800	7000	8200	9400	10900	13400
2	16000	20000	25000	30000	—	—	—	—	—	—

Таблица П1.5. Основная кривая намагничивания (статья 2013)

В, Тл	H, А/м									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1000	1130	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	1860	2020	2180	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10 000	10 600	11 200	11 800	12 400
1,9	13 000	13 600	14 200	14 800	15 600	16 500	17 300	18 100	18 900	19 800
2	20 700	22 600	24 400	26 300	28 100	30 000	36 000	42 000	48 000	54 000
2,1	60 000	67 000	74 000	81 000	88 000	95 000	102 000	109 000	116 000	123 000
2,2	130 000	138 000	146 000	154 000	162 000	170 000	178 000	186 000	194 000	202 000
2,3	210 000	218 000	226 000	234 000	242 000	250 000	258 000	266 000	274 000	282 000
2,4	290 000	298 000	306 000	314 000	322 000	330 000	338 000	346 000	354 000	362 000

Таблица П1.6. Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей (сталь 2013)

В, Тл	H, А/м										
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62	
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78	
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97	
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121	
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149	
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181	
1	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217	
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257	
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313	
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391	
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506	
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726	
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110	
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900	
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420	
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560	
2	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700	

Таблица П1.7. Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей (сталь 2013)

В, Тл	H, А/м												
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09			
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150			
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184			
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220			
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253			
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283			
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320			
1	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365			
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417			
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479			
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585			
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696			
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835			
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110			
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480			
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010			
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020			
2	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920			
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470			
2,2	8920	9430	9940	10 460	10 980	11 500	12 000	12 600	13 200	13 800			
2,3	14 400	15 100	15 800	16 500	17 200	1800	18 800	19 600	20 500	21 400			

Таблица III.8. Основная кривая намагничивания (стали 2212, 2214 и 2312)

В, Тл	H, А/м											
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09		
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75		
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85		
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95		
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135		
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185		
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235		
1	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294		
1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390		
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520		
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940		
1,4	1000	1060	1120	1180	1240	1300	1360	1420	1480	1540		
1,5	1600	1750	1900	2050	2200	2350	2500	2700	2900	3100		
1,6	3400	3600	3800	4100	4400	4700	5300	5900	6500	7100		
1,7	7700	8200	8900	9400	10 000	10 600	11 100	11 700	12 200	12 800		
1,8	13 400	14 000	14 600	15 200	15 800	16 400	17 000	17 600	18 200	18 800		
1,9	19 400	20 000	21 800	23 700	25 700	27 800	30 000	32 200	34 400	36 600		
2	38 800	41 000	43 200	45 400	47 600	49 800	52 000	54 500	57 500	60 500		
2,1	65 500	72 500	80 000	88 000	96 000	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000		
2,2	144 000	152 000	160 000	168 000	176 000	184 000	192 000	200 000	208 000	216 000		
2,3	224 000	232 000	240 000	248 000	256 000	264 000	272 000	280 000	288 000	296 000		
2,4	304 000	312 000	320 000	328 000	336 000	344 000	352 000	360 000	368 000	376 000		

Таблица П1.9. Кривая намагничивания для ядра асинхронных двигателей (стали 2212, 2214 и 2312)

В, Тл	H, А/м									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4301	4490	4670	4850	5040
1,9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2	10 400	11 100	11 800	12 500	13 300	14 100	14 900	15 800	16 700	17 600

Таблица П1.10. Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей (стали 2212, 2214 и 2312)

В, Тл	H, А/м									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	267	272	277	282	287
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,2	593	602	613	626	638	651	663	677	695	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	936	955	977	1000	1020	1040	1060	1090
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1310	1330	1370	1410
1,6	1450	1490	1530	1560	1610	1650	1690	1750	1790	1840
1,7	1900	1940	2000	2070	2140	2220	2300	2380	2500	2600
1,8	2700	2800	2920	3050	3220	3330	3490	3610	3710	4000
1,9	4160	4350	4600	4800	5030	5330	5430	5790	6130	6420
2	6750	7170	7400	7790	8150	8520	9000	9400	9750	10 200
2,1	10 600	11 000	11 500	12 100	12 600	13 000	13 500	14 100	14 700	15 400
2,2	15 900	16 500	17 300	17 800	18 500	19 100	19 600	20 300	21 100	22 000
2,3	23 100	24 300	25 500	26 800	28 100	29 500	30 900	32 400	33 900	36 400

Таблица П.1.1. Основная кривая намагничивания (сталь 2412)

В, Тл	H, А/м									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	187	194	199	205	211
1	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1,1	295	304	314	324	334	344	355	366	377	388
1,2	399	411	423	435	447	460	473	486	500	540
1,3	585	630	680	735	795	860	930	1000	1070	1150
1,4	1230	1320	1420	1520	1630	1750	1870	2010	2160	2320
1,5	2500	2680	2870	3080	3300	3540	3800	4090	4380	4700
1,6	5000	5380	5760	6200	6650	7120	7650	8200	8800	9400
1,7	10 000	10 500	11 000	11 500	12 000	12 500	13 100	13 700	14 300	14 900
1,8	15 600	16 200	16 800	17 500	18 300	19 100	20 000	20 900	21 900	22 900
1,9	23 900	25 000	26 200	27 400	28 700	30 000	32 000	36 000	42 000	50 000
2	59 000	68 000	77 000	86 000	95 000	104 000	113 000	122 000	131 000	140 000
2,1	149 000	158 000	167 000	176 000	185 000	194 000	203 000	212 000	221 000	230 000
2,2	239 000	248 000	257 000	266 000	275 000	284 000	293 000	302 000	311 000	320 000
2,3	329 000	333 800	347 000	356 000	365 000	374 000	383 000	392 000	401 000	410 000
2,4	419 000	428 000	437 000	446 000	455 000	464 000	473 000	482 000	491 000	500 000

Таблица III.12. Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей (сталь 2412)

В, Тл	H, А/м									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	48	48	49	50	51	51	52	52	53	54
0,5	55	56	56	57	58	59	60	61	61	62
0,6	63	64	65	66	67	68	69	69	70	71
0,7	72	72	73	74	75	76	76	77	78	79
0,8	81	82	83	84	85	87	88	90	92	94
0,9	96	98	100	102	104	105	107	109	112	114
1	116	118	121	124	126	129	132	136	139	143
1,1	146	150	154	158	162	167	172	176	182	188
1,2	192	198	204	210	216	222	230	238	246	260
1,3	272	288	300	316	330	340	358	370	386	399
1,4	410	440	460	490	530	570	610	660	710	770
1,5	820	890	960	1030	1100	1170	1230	1310	1400	1480
1,6	1560	1640	1730	1820	1920	2000	2100	2260	2440	2600
1,7	2800	2960	3100	3260	3400	3580	3740	3900	4100	4300
1,8	4500	4700	5000	5300	5500	5800	6100	6400	6800	7200
1,9	7600	8000	8500	9100	9700	10 300	11 100	11 900	13 100	14 200
2	16 000	18 000	20 000	22 000	23 800	25 500	27 600	29 600	31 500	33 800

Таблица III.13. Кривые намагничивания для зубцов асинхронных двигателей (статья 2412)

В, Тл	H, А/м									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	72	73	74	75	77	78	79	80	81	82
0,5	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
0,6	93	94	95	96	97	98	99	101	102	104
0,7	105	106	108	110	111	113	115	117	118	120
0,8	122	124	126	128	130	132	134	136	138	140
0,9	142	144	147	149	151	155	158	160	163	165
1	168	171	175	177	180	184	188	191	196	200
1,1	204	207	212	216	222	227	232	237	242	247
1,2	254	259	265	272	277	284	291	298	307	316
1,3	323	333	341	351	361	372	383	394	404	421
1,4	425	432	461	480	497	518	537	554	573	596
1,5	622	644	673	700	728	756	795	828	859	890
1,6	932	976	1020	1070	1130	1180	1260	1350	1440	1520
1,7	1630	1740	1870	2020	2130	2300	2450	2630	2830	3040
1,8	3190	3410	3590	3830	4100	4400	4600	4800	5100	5400
1,9	5700	5900	6300	6600	6900	7200	7700	8100	8300	8700
2	9200	9700	10 000	10 500	10 900	11 400	12 000	12 700	13 100	13 700
2,1	14 200	15 000	15 800	16 500	17 200	17 900	18 700	19 800	20 600	21 600
2,2	22 600	23 700	24 600	26 100	26 900	28 700	30 000	31 400	33 200	35 400
2,3	37 600	39 900	42 200	44 600	47 000	49 500	52 000	54 600	57 200	59 800

Таблица П1.14. Листовая сталь (Ст3) толщиной 1—2 мм (для полесоов)

В, Тп	Н, А/м									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,2	140	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,3	180	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,4	210	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,5	250	—	—	—	—	275	—	—	—	—
0,6	295	—	—	—	—	320	—	—	—	—
0,7	345	—	—	—	—	375	—	—	—	—
0,8	405	—	—	—	—	440	—	—	—	—
0,9	480	490	495	505	510	520	530	540	550	560
1	570	582	595	607	615	630	642	655	665	680
1,1	690	703	720	731	748	760	775	790	808	825
1,2	845	860	880	900	920	940	960	992	1015	1045
1,3	1080	1112	1145	1175	1220	1260	1300	1350	1393	1450
1,4	1490	1530	1595	1645	1700	1750	1835	1920	2010	2110
1,5	2270	2450	2560	2710	2880	3050	3200	3400	3650	3750
1,6	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5580	5950	6230	6600
1,7	7050	7530	7950	8400	8850	9320	9800	10 300	10 800	11 400
1,8	11 900	12 400	13 000	13 500	14 100	14 800	15 600	16 200	17 000	17 800
1,9	18 800	19 700	20 700	21 500	22 600	23 500	24 500	25 600	26 500	27 500
2	29 000	30 200	31 500	32 800	34 200	36 100	38 000	—	—	—

Таблица III.15. Литая сталь, толстые листы (Ст3), поковки

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
0,1	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152
0,2	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232
0,3	240	248	250	264	272	280	288	296	304	312
0,4	320	328	336	344	352	360	368	376	384	392
0,5	400	404	417	426	434	443	452	461	470	479
0,6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0,7	584	593	603	613	623	632	642	652	662	672
0,8	682	693	703	724	734	745	755	766	776	787
0,9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1	924	938	953	969	986	1004	1022	1039	1056	1073
1,1	1090	1108	1127	1147	1167	1187	1207	1227	1248	1269
1,2	1290	1315	1340	1370	1400	1430	1460	1490	1520	1555
1,3	1590	1630	1670	1720	1760	1810	1860	1920	1970	2030
1,4	2090	2160	2230	2300	2370	2440	2530	2620	2710	2800
1,5	2890	2990	3100	3210	3320	3430	3560	3700	3830	3960
1,6	4100	4250	4400	4550	4700	4870	5000	5150	5300	5500

Таблица III.16. Кривая намагничивания для полюсов (сталь 3411)

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
1	170	170	180	185	190	190	200	200	210	210
1,1	220	220	230	235	240	240	250	260	260	270
1,2	280	290	300	310	320	320	330	340	350	360
1,3	370	380	400	410	420	430	450	460	470	480
1,4	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680
1,5	700	730	760	790	820	850	880	910	940	970
1,6	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
1,7	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2800	3100	3400	3700
1,8	4000	4300	4600	5000	5400	5900	6500	7100	7800	8500
1,9	9200	10 000	11 200	130 000	15 500	19 000	22 500	26 000	30 000	35 000
2	40 000	45 000	50 000	55 000	60 000	—	—	—	—	—

Таблица П1.17. Удельные потери в листовой электротехнической стали
при $B = 1 \text{ Тл}$ и $f = 50 \text{ Гц}$

Марка стали	1211	1212	1311	1411	1412	1413
Толщина, мм	1	1	0,5	0,5	0,35	0,5
$P_1, \text{о/со: Вт/кг}$	5,8	5,4	2,5	2	1,8	1,55
	3,3	3,1		1,6	1,4	1,35
Марка стали	1511	1512	1513	3413	2011	
Толщина, мм	0,5	0,5	0,5	0,35	0,65	0,5
$P_1, \text{о/со: Вт/кг}$	1,55	1,4	1,25	0,6	3,8	3,5
	1,35	1,2	1,05			
Марка стали	2012	2013	2212	2214	2312	2412
Толщина, мм	0,65	0,65	0,65	0,5	0,65	0,5
$P_1, \text{о/со: Вт/кг}$	3,6	3,1	2,6	2	2,4	1,3
	2,9	2,5	2,2		1,75	1,15

Приложение 2

КРИВЫЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ* ДЛЯ ЗУБЦОВЫХ ЗОН С УЧЕТОМ ОТВЕТВЛЕНИЯ ПОТОКА В ПАЗЫ

B'_Z - расчетная индукция в зубцах, Тл.

$$k_{пх} = \frac{S_{пх}}{S_{Zx}} = \frac{b_{пх} l_{\delta}}{b_{Zx} l_{ст} k_c}$$

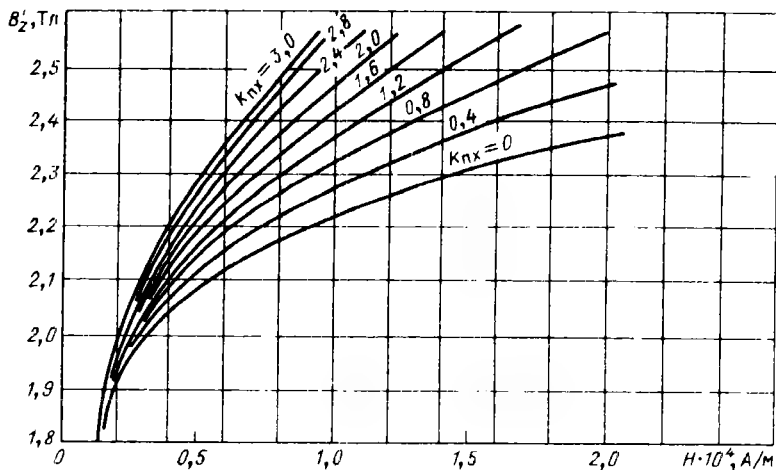


Рис. П2.1. Кривые намагничивания стали марки 2013 (к определению магнитного напряжения зубцовых зон асинхронных двигателей)

* См. приложение 1.

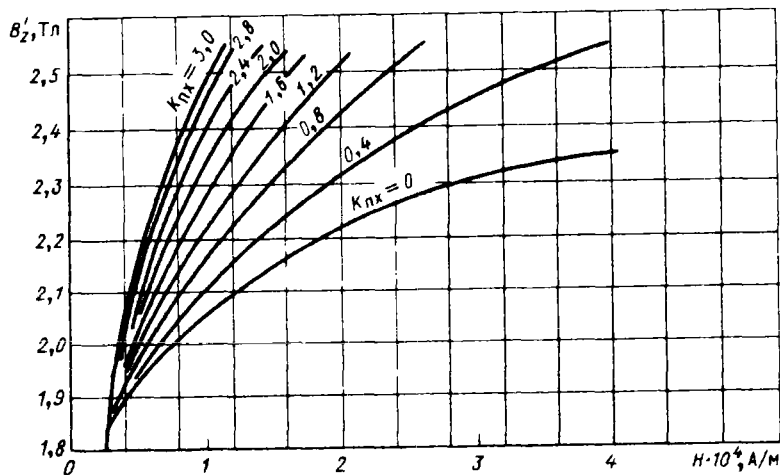


Рис. П2.2. Кривые намагничивания стали марок 2211, 2312, 2411 (к определению магнитного напряжения зон асинхронных двигателей)

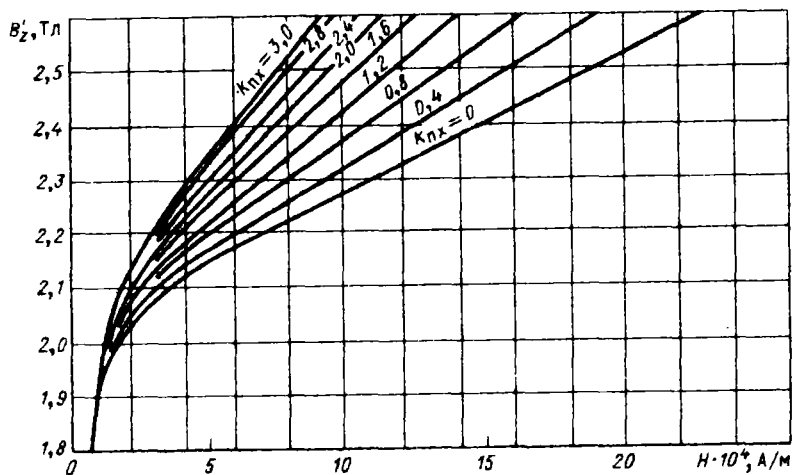


Рис. П2.3. Кривые намагничивания стали марки 2013 (к определению магнитного напряжения зубцовых зон машины постоянного тока и синхронных)

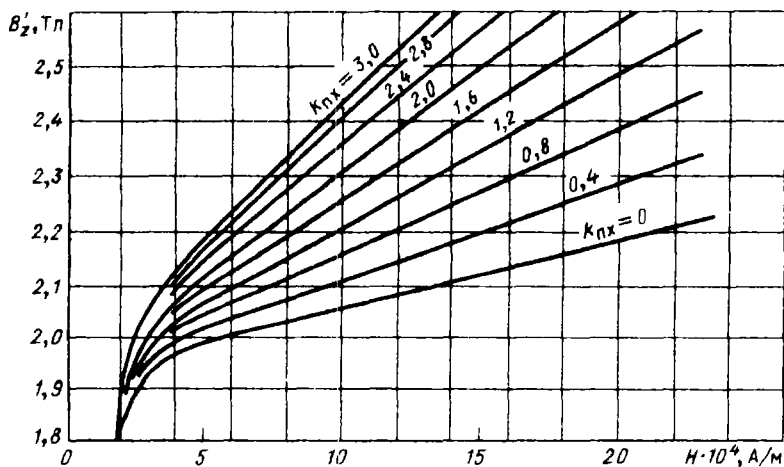


Рис. П2.4. Кривые намагничивания стали марок 2211, 2312, 2411 (к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

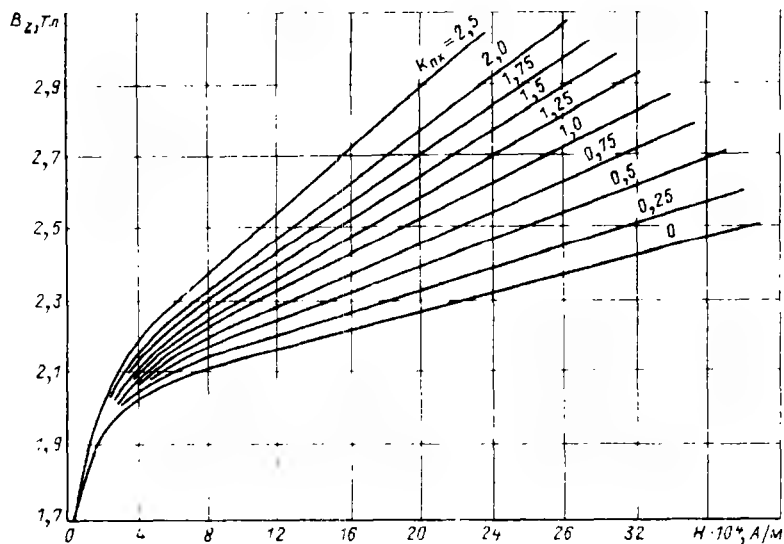


Рис. П2.5. Кривые намагничивания стали марок 1211, 1212, 1311 (к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

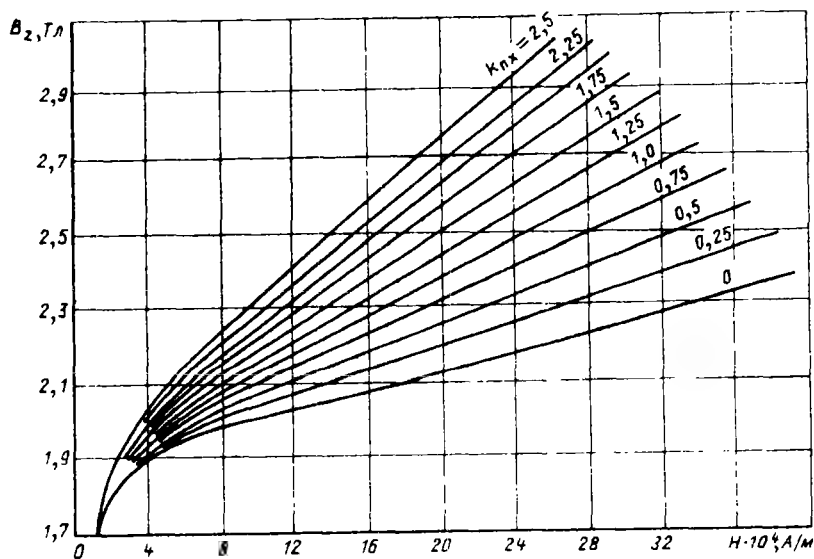


Рис. П2.6. Кривые намагничивания стали марки 1411 (к определению магнитного напряжения зон машин постоянного тока и синхронных)

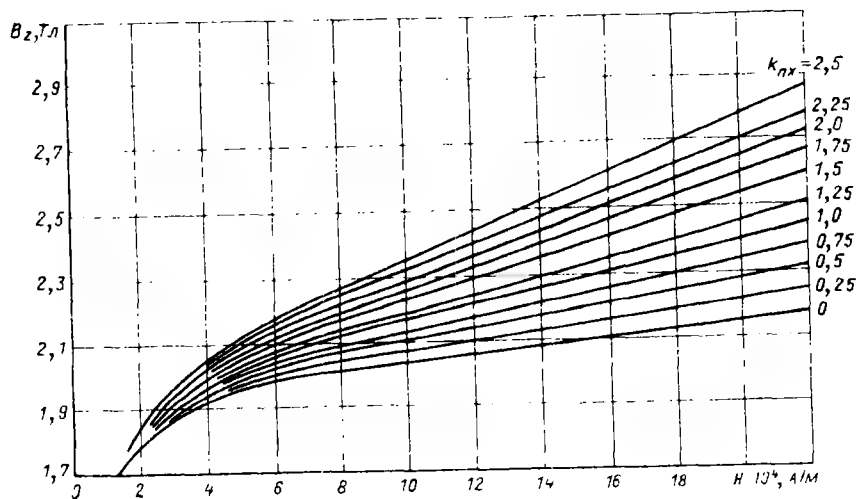


Рис. П2.7. Кривые намагничивания стали марок 1511, 1512, 1513 (к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

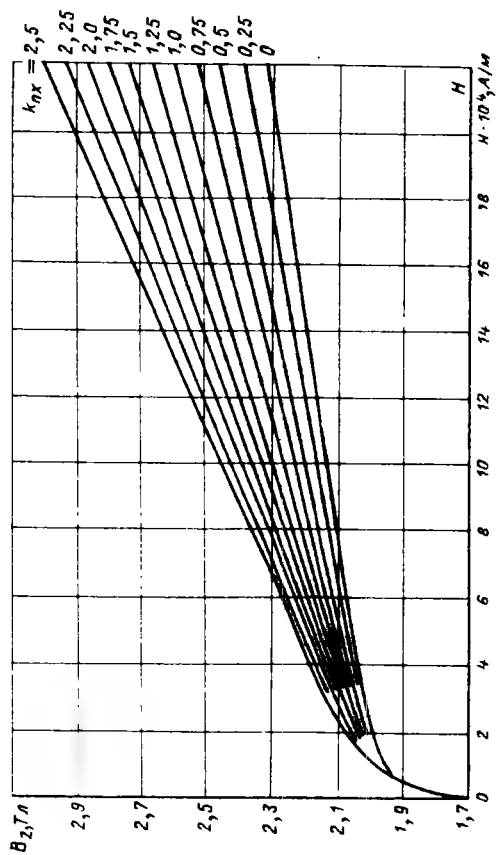


Рис. П2.8. Кривые намагничивания стали марки 3413 (к определению магнитного напряжения зубцовых зон машины постоянного тока и синхронных)

Приложение 3

ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА, ЛЕНТЫ И ШИНЫ

Таблица ПЗ.1. Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТВ-155

Номинальный диаметр не-изолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения не-изолированного провода, мм ²	Номинальный диаметр не-изолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения не-изолированного провода, мм ²
0,08	0,1	0,00502	(0,53)	0,585	0,221
0,09	0,11	0,00636	0,56	0,615	0,246
0,1	0,122	0,00785	0,6	0,655	0,283
0,112	0,134	0,00985	0,63	0,69	0,312
0,125	0,147	0,01227	(0,67)	0,73	0,353
(0,132)	0,154	0,01368	0,71	0,77	0,396
0,14	0,162	0,01539	0,75	0,815	0,442
0,15	0,18	0,01767	0,8	0,865	0,503
0,16	0,19	0,0201	0,85	0,915	0,567
0,17	0,2	0,0227	0,9	0,965	0,636
0,18	0,21	0,0255	0,95	1,015	0,709
(0,19)	0,22	0,0284	1	1,08	0,785
0,2	0,23	0,0314	1,06	1,14	0,883
(0,212)	0,242	0,0353	1,12	1,2	0,985
0,224	0,259	0,0394	1,18	1,26	1,094
(0,236)	0,271	0,0437	1,25	1,33	1,227
0,25	0,285	0,0491	1,32	1,405	1,368
(0,265)	0,3	0,0552	1,40	1,485	1,539
0,28	0,315	0,0616	1,5	1,585	1,767
(0,3)	0,335	0,0707	1,6	1,685	2,011
0,315	0,35	0,0779	1,7	1,785	2,27
0,335	0,37	0,0881	1,8	1,895	2,54
0,355	0,395	0,099	1,9	1,995	2,83
0,375	0,415	0,1104	2	2,095	3,14
0,4	0,44	0,1257	2,12	2,22	3,53
0,425	0,565	0,1419	2,24	2,34	3,94
0,45	0,49	0,159	2,36	2,46	4,36
(0,475)	0,515	0,1772	2,5	2,6	4,91
0,5	0,545	0,1963			

П р и м е ч а н и е. Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только при обосновании технико-экономической целесообразности.

Таблица ПЗ.2 Размеры и площади поперечного сечения прямоугольной проволоки

Номинальный размер проволоки по большей стороне b , мм	Номинальный размер проволоки по							
	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,06	1,12	1,18
	Расчетное сечение							
2	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145
2,12	1,559	—	1,734	—	1,905	—	2,16	—
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,16	1,294	2,429
2,36	1,751	—	1,95	—	2,145	—	2,429	—
2,5	1,863	1,97	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736
2,65	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—
2,8	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089
3	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974
3,75	2,863	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—
4	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505
4,25	3,263	—	3,651	—	4,035	—	4,545	—
4,5	3,463	3,67	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095
4,75	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—
5	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685
5,3	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—
5,6	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393
6	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—
6,3	4,903	5,2	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219
6,7	—	—	5,856	—	6,485	—	7,289	—
7,1	—	—	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163
7,5	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—
8	—	—	—	—	7,785	8,265	8,745	9,225
8,5	—	—	—	—	—	—	9,305	—
9	—	—	—	—	—	—	9,865	10,41
9,5	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—
10,6	—	—	—	—	—	—	—	—
11,2	—	—	—	—	—	—	—	—
11,8	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—

меньшей стороне a , мм

1,25	1,32	1,4	1,15	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12
------	------	-----	------	-----	-----	-----	-----	---	------

чение проволоки, мм²

2,285	2,425	2,585	—	—	—	—	—	—	—
2,435	—	2,753	—	—	—	—	—	—	—
2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	—	—	—	—	—
2,735	—	3,089	—	3,561	—	—	—	—	—
2,91	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—
3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—
3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—
3,535	—	3,985	—	4,585	—	5,038	—	5,638	—
3,723	3,943	4,195	4,51	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—
4,223	4,471	4,755	5,11	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—
4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,287	—	8,137	—
5,41	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
5,723	—	6,435	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—
6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
6,41	—	7,205	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—
6,785	8,101	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
7,285	—	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—
7,66	9,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
8,16	—	9,165	—	10,51	—	11,7	—	13,04	—
8,66	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
9,16	—	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—
9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,6
10,41	—	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—
11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
11,66	—	13,09	—	14,99	—	16,74	—	18,64	—
12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
—	—	14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—
—	—	15,47	16,59	17,71	18,68	19,8	20,92	22,04	23,38
—	—	—	—	18,67	—	20,88	—	23,24	—
—	—	—	—	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14

Продолжение табл. ПЗ.2

Номинальный размер прово- локи по большой стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по							
	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3	3,15	3,35
	Расчетное сечение							
2	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	—	—	—	—	—	—	—	—
2,36	—	—	—	—	—	—	—	—
2,5	—	—	—	—	—	—	—	—
2,65	—	—	—	—	—	—	—	—
2,8	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15	6,693	—	—	—	—	—	—	—
3,35	7,141	—	—	—	—	—	—	—
3,55	7,589	7,829	8,326	—	—	—	—	—
3,75	8,037	—	8,826	—	—	—	—	—
4	8,597	8,891	9,451	10,65	10,85	—	—	—
4,25	9,157	—	10,08	—	11,35	—	—	—
4,5	9,717	10,07	10,7	11,38	12,05	12,95	13,63	—
4,75	10,28	—	11,33	—	12,75	—	14,41	—
5	10,84	11,25	11,95	12,7	13,45	14,45	15,2	16,2
5,3	11,51	—	12,7	—	14,29	—	16,15	—
5,6	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21
6	13,08	—	14,45	—	16,25	—	18,35	—
6,3	13,75	14,32	15,2	16,15	17,09	18,35	19,3	20,56
6,7	14,65	—	16,2	—	18,21	—	20,56	—
7,1	15,54	16,21	17,2	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24
7,5	16,44	—	18,2	—	20,45	—	23,08	—
8	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25
8,5	18,68	—	20,7	—	23,25	—	26,23	—
9	19,8	20,69	21,95	23,3	24,65	26,54	27,8	29,6
9,5	20,92	—	23,2	—	26,05	—	29,38	—
10	22,04	23,05	24,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95
10,8	23,38	—	25,95	—	29,13	—	32,84	—
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97
11,8	26,07	—	28,95	—	32,49	—	36,62	—
12,5	27,64	24,95	30,7	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33

меньшей стороне a , мм

3,55 3,75 4 4,25 4,5 4,75 5 5,3 5,6

проволоки, мм²

—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
17,2	—	—	—	—	—	—	—	—
18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
19,33	20,14	21,54	—	—	—	—	—	—
20,75	—	23,14	—	—	—	—	—	—
21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—
23,24	—	25,94	—	29,29	—	—	—	—
24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—
26,08	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
29,63	—	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74
31,4	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
33,18	—	37,14	—	41,39	—	46,64	—	52,34
34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
37,08	—	41,54	—	46,34	—	52,14	—	58,5
39,21	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,5	61,86
41,34	—	46,34	—	52,24	—	52,14	—	65,22
43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Продолжение табл. ПЗ.2

Номинальный размер проволо- ки по боль- шей стороне <i>b</i> , мм	Номинальный размер проволоки					
	3,28	3,35	3,53	3,55	3,75	3,8
	Расчетное сечение					
10,8	—	—	—	—	—	—
11,2	—	36,97	—	39,21	41,14	—
11,6	—	—	—	—	—	—
11,8	—	—	—	41,34	—	—
12,5	—	41,33	—	43,83	46,02	—
13,2	—	—	—	46,31	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—
14	—	46,35	—	49,15	51,95	—
14,5	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	52,7	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—
16	—	53,05	—	56,25	59,14	—
16,8	54,62	—	58,82	—	—	63,36
18	58,56	—	63,06	—	—	67,92
19,5	63,48	—	68,35	—	—	73,62
20	—	—	—	—	—	—
22	71,68	—	77,18	—	—	83,12
25	81,52	—	87,77	—	—	94,52
26,3	—	—	92,36	—	—	99,46
28	—	—	—	—	—	105,92
30	—	—	—	—	—	113,52
32	—	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	—	—

по меньшей стороне a , мм						
4	4,1	4,25	4,4	4,5	4,7	4,75
проволоки, мм ²						
—	—	—	—	—	—	—
43,94	—	46,74	—	49,54	—	52,34
—	—	—	—	—	—	—
46,34	—	—	—	52,24	—	—
49,14	—	52,27	—	55,39	—	58,52
51,94	—	—	—	58,54	—	—
—	—	—	—	—	—	—
55,14	—	58,64	—	62,14	—	66,64
—	—	—	—	—	—	—
59,14	—	—	—	66,64	—	—
—	—	—	—	—	—	—
63,14	—	67,14	—	71,14	—	75,14
—	68,02	—	73,06	—	78,1	—
—	72,94	—	78,34	—	83,74	—
—	79,09	—	84,94	—	90,79	—
79,52	—	—	—	—	—	—
—	89,34	—	95,94	—	102,54	—
99,52	101,64	—	109,14	—	116,4	—
—	106,97	—	114,86	—	122,75	—
111,94	113,94	—	122,34	—	130,74	—
119,52	122,14	—	131,14	—	140,14	—
—	130,34	—	139,94	—	149,54	—
—	—	—	153,14	—	163,64	—

Продолжение табл. ПЗ.2

Номинальный размер прово- локи по боль- шей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки					
	5	5,1	5,3	5,5	5,6	6
	Расчетное сечение					
10,8	—	—	—	—	—	—
11,2	55,14	—	58,50	—	61,86	—
11,6	—	—	—	—	—	—
11,8	58,14	—	—	—	65,22	—
12,5	61,64	—	65,39	—	69,14	—
13,2	65,14	—	—	—	73,06	—
13,5	—	—	—	—	—	—
14	69,14	—	73,34	—	77,54	—
14,5	—	—	—	—	—	—
15	74,14	—	—	—	83,14	—
15,6	—	—	—	—	—	—
16	79,14	—	83,94	—	88,74	95,14
16,8	—	84,82	—	91,54	—	99,94
18	—	90,94	—	98,14	—	107,14
19,5	—	98,59	—	106,39	—	116,14
20	99,14	—	—	—	—	119,14
22	—	111,34	—	120,14	—	131,14
25	124,14	126,64	—	136,64	—	149,14
26,3	—	133,27	—	143,79	—	158,94
28	—	141,94	—	153,14	—	167,14
30	149,14	152,14	—	164,14	—	—
32	—	162,34	—	175,14	—	—
35	—	—	—	—	—	—

по меньшей стороне a , мм

6,5	7	8	9	10	11	12,5
проволоки, мм ²						
—	—	—	96,34	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	103,54	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
—	—	99,14	111,64	124,14	136,66	155,41
—	—	—	—	—	—	—
—	93,64	107,14	120,64	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
93,39	100,64	115,14	129,64	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
100,54	108,34	123,94	139,54	154,14	—	—
—	—	127,14	—	—	—	—
108,34	116,74	133,54	—	—	—	—
116,14	125,14	143,14	—	—	—	—
125,89	135,64	155,14	—	—	—	—
—	—	159,14	—	—	—	—
142,14	153,14	—	—	—	—	—
161,64	174,14	—	—	—	—	—
170,09	183,24	—	—	—	—	—
181,14	195,14	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—

Двусторонняя толщина изоляции

Марка провода	при диаметрах голого провода d , мм						прямоугольного провода при меньшей стороне сечения голого провода, мм	
	1-1,4	1,5-1,6	1,7-2,12	2,24-5	5-5,2	0,85-1,9	2,12-3,75	4-5,6
ПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
АПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
ПЭЛБО	0,21	0,21	0,21	-	-	-	-	-
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,135	0,155	0,155	-	-	-	-	-
ПСД, ПСДК	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,4
ПСДТ	0,21	0,21	0,23	-	-	-	-	-
ПСДКТ	0,18	0,18	-	-	-	0,22	-	-
ПДА	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,4	0,4	0,4
ПЭВП, ПЭМП,	-	-	-	-	-	0,1-0,12	0,15	-
ПЭВПИ, ПЭТВП	-	-	-	-	-	0,45	0,45	0,5
ПШТБО, ПШЛБО	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица ПЗ.4. Номинальные размеры, мм, и расчетные сечения, мм², лент

b	a							
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6
8	0,8	1,2	1,6	2	2,4	3,2	4	4,8
8,6	—	—	—	—	—	—	4,3	5,16
9,3	—	—	—	—	—	—	4,65	5,58
10	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6
10,8	—	—	—	—	—	—	5,4	6,48
11,6	—	—	—	—	—	—	5,8	6,96
12,5	1,25	1,88	2,5	3,13	3,75	5	6,25	7,5
13,5	—	—	—	—	—	—	6,75	8,1
14	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2	5,6	7	8,4
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—
16	1,6	2,4	3,2	4	4,8	6,4	8	9,6
16,8	—	—	—	—	—	—	8,4	10,1
18	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	7,2	9	10,8
19,5	—	—	—	—	—	—	—	—
20	2	3	4	5	6	8	10	12
22	2,2	3,3	4,4	5,5	6,6	8,8	11	13,2
25	2,5	3,75	5	6,25	7,5	10	12,5	15
26,3	—	—	—	—	—	—	13,2	15,8
28	2,8	4,2	5,6	7	8,4	11,2	14	16,8
30	3	4,5	6	7,5	9	12	15	18
32	3,2	4,8	6,4	8	9,6	12,8	16	19,2
35	3,5	5,25	—	—	10,5	—	17,5	—
40	4	6	8	10	12	16	20	24
45	—	6,75	—	—	13,5	—	22,5	—
47	—	—	—	—	—	—	—	—
50	5	7,5	10	12,5	15	20	25	30
55	—	—	—	—	16,5	—	27,5	—
60	6	9	12	15	18	24	30	36
65	—	—	—	—	—	—	—	—
70	—	—	14	—	21	28	35,3	42
75	—	—	—	—	22,5	30	37,5	45
80	—	—	16	—	24	32	40	48
90	—	—	—	—	—	—	—	—
100	—	—	20	—	—	—	50	—

a							
0,7	0,8	0,9	1	1,08	1,16	1,25	1,35
5,6	6,4	7,2	—	—	—	—	—
6,02	6,88	7,74	—	—	—	—	—
6,51	7,44	8,37	9,08	—	—	—	—
7	8	9	9,78	10,6	—	—	—
7,56	8,64	9,72	10,6	11,4	12,2	—	—
8,12	9,28	10,4	11,4	12,3	13,2	14,2	—
8,75	10	11,3	12,3	13,3	14,2	15,3	16,5
9,45	10,8	12,2	13,3	14,3	15,4	16,5	17,8
9,8	11,2	12,6	—	—	—	—	—
—	—	—	14,3	15,4	16,5	17,9	19,2
—	—	—	15,4	16,6	17,8	19,2	20,7
11,2	12,8	14,4	—	—	—	—	—
11,8	13,4	15,1	16,6	17,9	19,2	20,7	22,3
12,6	14,4	16,2	17,8	19,2	20,6	22,2	23,9
—	—	—	19,3	20,8	22,3	24,0	25,9
14	16	18	—	—	—	—	—
15,4	17,6	19,8	21,8	23,5	25,2	27,2	29,3
17,5	20	22,5	24,8	26,8	28,7	30,9	33,4
18,4	21	23,7	26,1	28,2	30,2	32,5	35,1
19,6	22,4	25,2	27,8	30	32,2	34,7	37,4
21	24	27	29,8	32,2	34,5	37,2	40,1
22,4	25,6	28,8	31,8	34,3	36,8	39,7	42,8
24,5	28,8	—	34,8	37,6	40,3	43,4	46,9
28	32	36	39,8	43	46,1	49,7	53,6
31,5	36	—	44,8	—	—	55,9	60,4
—	—	—	—	—	—	—	—
35	40	45	49,8	53,8	57,7	62,2	67,1
38,5	44	—	54,8	—	—	—	—
42	48	54	59,8	64,6	69,3	74,4	80,6
45,5	—	—	64,8	—	—	—	—
—	56	63	69,8	—	—	—	—
52,5	60	67,5	74,8	—	—	—	—
—	64	72	79,8	—	—	—	—
—	72	—	—	—	—	—	—
—	80	—	99,8	—	—	—	—

Продолжение табл. ПЗ.4

Б	а							
	1,45	1,5	1,56	1,68	1,81	1,95	2	2,1
8	—	—	—	—	—	—	—	—
8,6	—	—	—	—	—	—	—	—
9,3	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	19,1	—	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	20,6	—	22,1	—	—	—	—	—
15,6	22,2	—	23,8	25,6	—	—	—	—
16	—	23,5	—	—	—	—	—	—
16,8	23,9	—	25,7	27,6	29,7	—	—	—
18	25,7	—	27,6	29,6	31,9	34,3	—	—
19,5	27,9	—	29,9	32,2	34,6	37,2	—	40
20	—	29,5	—	—	—	—	39,1	—
22	31,5	—	33,8	36,4	39,1	42,1	—	45,3
25	35,8	37	38,5	41,4	44,6	47,9	49,1	51,6
26,3	37,7	—	40,5	43,6	46,9	50,5	—	54,3
28	40,2	—	43,2	46,4	50	53,8	—	57,9
30	43,1	44,5	46,3	49,8	53,6	57,7	59,1	62,1
32	46	—	49,4	53,2	57,2	61,6	—	66,3
35	50,3	—	54,1	58,2	62,7	67,4	—	72,6
40	57,6	59,5	61,9	66,6	71,7	77,2	79,1	83,1
45	64,8	—	69,7	75	80,8	86,9	—	93,6
47	—	—	—	—	—	—	—	—
50	72,1	74,5	77,5	83,4	89,8	96,7	99,1	104,1
55	—	—	85,3	91,8	98,9	106,4	—	114,6
60	86,6	—	93,1	100,2	107,9	116,2	—	125,1
65	—	—	100,9	—	—	125,9	—	—
70	—	—	108,7	—	—	135,7	—	—
75	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	—	124,3	—	—	155,2	—	—
90	—	—	139,9	—	—	174,7	—	—
100	—	—	155,5	—	—	194,2	—	—

[illegible]

Таблица ПЗ.5. Номинальные размеры, мм, и расчетные сечения, мм², шин

b	a								
	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	8	9
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	199,1	224,1
30	—	—	—	—	179,1	194,1	209,1	239,1	269,1
32	—	—	—	—	191,1	207,1	—	—	—
35	—	—	174,1	191,6	209,1	226,6	—	279,1	—
40	159,5	179,1	199,1	219,1	239,1	259,1	279,1	319,1	359,1
45	179,5	201,6	224,1	246,6	269,1	291,6	314,1	359,1	404,1
50	199,5	224,1	249,1	274,1	299,1	324,1	349,1	399,1	449,1
55	219,5	246,6	274,1	301,1	329,1	356,6	384,1	429,1	494,1
60	239,5	269,1	299,1	329,1	359,1	389,1	439,1	479,1	539,1
65	259,5	291,6	324,1	—	389,1	—	454,1	—	584,1
70	279,5	314,1	349,1	—	—	—	—	559,1	629,1
75	—	—	—	—	—	—	—	599,1	—
80	319,5	359,1	399,1	—	479,1	—	559,1	639,1	—
90	359,5	404,1	449,1	—	539,1	—	629,1	719,1	—
100	399,5	449,1	499,1	—	599,1	—	699,1	799,1	—
120	—	—	—	—	—	—	—	959,1	—

b	a								
	10	11	12,5	14	16	18	20	25	30
16	—	175,1	199,1	233,1	255,1	—	—	—	—
20	199,1	219,1	249,1	279,1	319,1	359,1	399,1	—	—
25	249,1	274,1	311,6	349,1	399,1	449,1	499,1	624,1	—
30	299,1	329,1	374,1	419,1	479,1	539,1	599,1	749,1	899,1
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	349,1	—	436,6	—	—	—	699,1	—	—
40	399,1	439,1	499,1	559,1	639,1	719,1	799,1	999,1	1199,1
45	449,1	494,1	561,6	629,1	719,1	809,1	899,1	—	1349,1
50	499,1	549,1	624,1	699,1	799,1	899,1	999,1	—	—
55	549,1	—	686,6	—	879,1	—	1099,1	—	—
60	599,1	—	749,1	—	959,1	—	1199,1	—	—
65	649,1	—	811,6	—	1039,1	—	—	—	—
70	699,1	—	874,1	—	1119,1	—	—	—	—
75	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	799,1	—	999,1	—	—	—	—	—	—
90	899,1	—	1124,1	—	—	—	—	—	—
100	999,1	—	1249,1	—	—	—	—	—	—
120	1199,1	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Расчетные сечения указаны с учетом закругления углов.

Таблица ПЗ.6. Прессованные шины из алюминия марки АДО

Номинальный размер шины по меньшей стороне, мм	Номинальный размер шины по большей стороне, мм	Площадь попереч- ного се- чения, мм ²	Номинальный размер шины по меньшей стороне, мм	Номинальный размер шины по большей стороне, мм	Площадь попереч- ного се- чения, мм ²
4	30	120	5	50	250
4	40	160	5	60	300
4	50	200	6	30	180
4	60	240	6	40	240
5	30	150	6	50	300
5	40	200	6	60	360

Приложение 4

ЩЕТКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Таблица П4.1. Шкала размеров электрощеток (в миллиметрах), $b_{щ} \times l_{щ} \times h_{щ}$

Танген- циаль- ный размер $b_{щ}$	Осевой размер $l_{щ}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
4	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12,5	12,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	16	16	16	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	20	20	20	20	-	-	-	-	-
5	-	12,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	16	16	16	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	20	20	20	20	-	-	-	-	-
	-	-	25	25	25	25	25	-	-	-	-
	-	-	-	-	32	32	32	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-
6,3	-	-	20	20	20	-	-	-	-	-	-
	-	-	25	25	25	25	25	-	-	-	-
	-	-	-	32	32	32	32	32	32	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	40	40	-	-
8	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	25	25	25	25	25	-	-	-
	-	-	-	32	32	32	32	32	32	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	40	40	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	50	50	-	-
	-	-	-	-	25	25	25	-	-	-	-
	-	-	-	-	32	32	32	32	32	-	-
	-	-	-	-	-	-	40	40	40	40	-
12,5	-	-	-	-	-	-	-	50	50	50	-
	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	32	32	32	32	-	-
	-	-	-	-	-	-	40	40	40	40	-
	-	-	-	-	-	-	-	50	50	50	50
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	64	64

Танген- циаль- ный размер $b_{ш}$	Осевой размер $l_{ш}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
16	—	—	—	—	—	—	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
20	—	—	—	—	—	—	—	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
25	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64	64
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100

Примечание. Щетки шириной 25 мм и выше подразделяются на две.

Таблица П4.2. Рекомендуемые расчетные параметры и условия работы щеток для электрических машин общего назначения

Обозначения марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность, A/cm^2	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Предпочтительная область применения
Г-20	Угольно-	2,9	15	40	50	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г-21	графит-	4,3	5	30	15–100	
Г-22	ные	2,5	10	30	40	

Продолжение табл. П4.2

Обозначения марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность, А/см ²	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
ГЗ	Графитные	1,9	11	25	20 - 25	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
611М		2	12	40	20 - 25	
6110М		2	15	90	12 - 22	
ЭГ2А	Электрографитированные	2,6	10	45	20 - 25	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2АФ		2,2	15	90	15 - 21	
ЭГ4		2	12	40	15 - 20	
ЭГ8		2,4	10	40	20 - 40	
ЭГ14	"	2,5	11	40	20 - 40	То же
ЭГ51		2,2	12	60	20 - 25	
ЭГ61		3	13	60	35 - 50	
ЭГ71		2,2	12	40	20 - 25	
ЭГ74		2,7	15	50	17,5 - 25	
ЭГ74АФ		2,3	15	60	15 - 21	
ЭГ85		2,3	15	50	17,5 - 35	
М1	Металлографитные	1,5	15	25	15 - 20	Низковольтные генераторы и контактные кольца
М3		1,8	12	20	15 - 20	
М6		1,5	15	25	15 - 20	
М20		1,4	12	20	15 - 20	
МГ	"	0,2	20	20	18 - 23	То же
МГ2		0,5	20	20	18 - 23	
МГ4		1,1	15	20	20 - 25	
МГ64		0,5	25	25	15 - 20	
МГС0		0,2	20	20	18 - 23	
МГС5		2	15	35	20 - 25	

Примечания: 1. При работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и больших частот вращения коллектора (свыше 1500 об/мин) давление на щетку может быть повышено до 50 кПа.

2. Плотность тока щетки должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации каждого конкретного типа электрической машины.

3. Коэффициент трения щеток о коллектор принимается равным 0,25 для всех марок щеток.

Приложение 5

ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ

Таблица П5.1. Шарикоподшипники радиальные однорядные по ГОСТ 8338-75 (рис. 11.18)

Условное обозначение подшипника	<i>d</i> , мм	<i>D</i> , мм	<i>B</i> , мм	<i>r</i> , мм	<i>C</i> , Н	<i>C</i> ₀ , Н	<i>n</i> , об/мин
<i>Легкая серия</i>							
200	10	30	9	1	4600	2610	20 000
201	12	32	10	1	4700	2650	20 000
202	15	35	11	1	5850	3470	16 000
203	17	40	12	1	7400	4400	16 000
204	20	47	14	1,5	9800	6200	12 500
205	25	52	15	1,5	10 800	6950	10 000
206	30	62	16	1,5	15 000	10 000	10 000
207	35	72	17	2	19 700	13 600	8000
208	40	80	18	2	25 100	17 800	6300
209	45	85	19	2	25 200	17 800	6300
210	50	90	20	2	27 000	19 800	6300
211	55	100	21	2,5	33 400	25 100	5000
212	60	110	22	2,5	40 400	30 900	5000
213	65	120	23	2,5	44 000	34 000	5000
214	70	125	24	2,5	48 000	37 400	4000
215	75	130	25	2,5	51 000	41 000	4000
216	80	140	26	3	56 000	44 500	4000
217	85	150	28	3	64 000	53 100	4000
218	90	160	30	3	74 000	60 500	3150
219	95	170	32	3,5	84 000	69 500	3150
220	100	180	34	3,5	94 000	79 000	3150
<i>Средняя серия</i>							
300	10	35	11	1	6250	3750	20 000
301	12	37	12	1,5	7500	4640	16 000
302	15	42	13	1,5	8750	5400	16 000
303	17	47	14	1,5	10 700	6670	12 500
304	20	52	15	2	12 250	7780	12 500
305	25	62	17	2	17 250	11 400	10 000

Условное обозначение под- шипника	<i>d</i> , мм	<i>D</i> , мм	<i>B</i> , мм	<i>r</i> , мм	<i>C</i> , Н	<i>C</i> ₀ , Н	<i>n</i> , об/мин
306	30	72	19	2	21 600	14 800	8000
307	35	80	21	2,5	25 700	17 550	8000
308	40	90	23	2,5	31 300	22 200	6300
309	45	100	25	2,5	37 000	26 200	6300
310	50	110	27	3	47 500	35 600	5000
311	55	120	29	3	55 000	41 800	5000
312	60	130	31	3,5	63 000	48 400	4000
313	65	140	33	3,5	71 300	55 600	4000
314	70	150	35	3,5	80 200	63 200	4000
315	75	160	37	3,5	87 500	71 500	3150
316	80	170	39	3,5	94 600	80 200	3150
317	85	180	41	4	102 000	89 400	3150
318	90	190	43	4	110 000	99 000	3150
319	95	200	45	4	117 600	109 000	2500
320	100	215	47	4	134 000	130 000	2500
321	105	225	49	4	141 000	142 000	2500
322	110	240	50	4	158 000	167 000	2500
324	120	260	55	4	167 000	180 000	2000
326	130	280	58	5	176 500	194 000	1600

Тяжелая серия

403	17	62	17	2	17 500	11 900	10 000
405	25	80	21	2,5	28 600	20 400	8000
406	30	90	23	2,5	36 500	26 800	6300
407	35	100	25	2,5	43 000	31 300	6300
408	40	110	27	3	49 500	36 400	5000
409	45	120	29	3	59 300	45 500	5000
410	50	130	31	3,5	67 200	52 000	4000
411	55	140	33	3,5	77 300	62 500	4000
412	60	150	35	3,5	84 000	70 000	3150
413	65	160	37	3,5	91 000	78 000	3150
414	70	180	42	4	111 000	105 000	3150
415	75	190	45	4	117 000	115 000	3150
416	80	200	48	4	126 000	125 000	2500
417	85	210	52	5	134 000	136 000	2500

Таблица П5.2. Роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами по ГОСТ 8328-75 (рис. 11.19)

Условное обозначение подшипника	<i>d</i> , мм	<i>D</i> , мм	<i>B</i> , мм	<i>r</i> , мм	<i>C</i> , Н	<i>C</i> ₀ , Н	<i>n</i> , об/мин
<i>Легкая узкая серия</i>							
2202, 32202, 42202	15	35	11	1	5520	3020	16 000
2204, 32204, 42204	20	47	14	1,5	11 700	7250	12 500
2205, 32205, 42205	25	52	15	1,5	13 200	8450	10 000
2206, 32206, 42206	30	62	16	1,5	17 000	11 200	10 000
2207, 32207, 42207	35	72	17	2	25 000	17 200	8000
2208, 32208, 42208	40	80	18	2	33 000	23 500	8000
2209, 32209, 42209	45	85	19	2	34 300	25 200	6300
2210, 32210, 42210	50	90	20	2	38 000	28 600	6300
2211, 32211, 42211	55	100	21	2,5	43 000	32 300	6300
2212, 32212, 42212	60	110	22	2,5	53 700	42 000	5000
2213, 32213, 42213	65	120	23	2,5	61 000	47 600	5000
2214, 32214, 42214	70	125	24	2,5	67 500	47 700	4000
2215, 32215, 42215	75	130	25	2,5	76 500	60 000	4000
2216, 32216, 42216	80	140	26	3	78 000	62 300	4000
2217, 32217, 42217	85	150	28	3	97 000	80 900	3150
2218, 32218, 42218	90	160	30	3	119 000	99 000	3150
—, 32219, 42219	95	170	32	3,5	130 000	109 000	3150
2220, 32220, —	100	180	34	3,5	132 500	109 000	2500
—, 32221, 42221	105	190	36	3,5	160 000	137 000	2500
2222, 32222, —	110	200	38	3,5	185 000	159 000	2500
2224, 32224, 42224	120	215	40	3,5	209 000	185 000	2500
2226, 32226, 42226	130	230	40	4	217 000	195 000	2000
2228, 32228, 42228	140	250	42	4	254 000	232 000	2000
<i>Средняя узкая серия</i>							
2305, 32305, 42305	25	62	17	2	22 200	14 500	8000
2306, 32306, 42306	30	72	19	2	29 600	20 200	8000
2307, 32307, 42307	35	80	21	2,5	33 400	22 800	6300
2308, 32308, 42308	40	90	23	2,5	40 200	28 000	6300
2309, 32309, 42309	45	100	25	2,5	55 500	40 000	6300
2310, 32310, 42310	50	110	27	3	64 000	46 500	5000
2311, 32311, 42311	55	120	29	3	82 500	61 500	5000
2312, 32312, 42312	60	130	31	3,5	98 000	75 800	4000
2313, 32313, 42313	65	140	33	3,5	103 000	78 000	4000
2314, 32314, 42314	70	150	35	3,5	121 000	95 500	4000
2315, 32315, 42315	75	160	37	3,5	139 000	110 000	3150
2316, 32316, 42316	80	170	39	3,5	147 000	118 500	3150
2317, 32317, 42317	85	180	41	4	175 000	143 000	3150
2318, 32318, 42318	90	190	43	4	190 000	157 000	2500
2319, 32319, 42319	95	200	45	4	206 000	171 500	2500
2320, 32320, 42320	100	215	47	4	238 000	197 000	2500
2322, 32322, 42322	110	240	50	4	301 000	257 000	2000
2324, 32324, 42324	120	260	55	4	380 000	332 000	2000

Продолжение табл. П5.2

Условное обозначение подшипника	<i>d</i> , мм	<i>D</i> , мм	<i>B</i> , мм	<i>r</i> , мм	<i>C</i> , Н	<i>C</i> ₀ , Н	<i>n</i> , об/мин
2326, 32326, 42326	130	280	58	5	424 000	374 000	2000
2328, 32328, 42328	140	300	62	5	469 000	419 000	1600
2332, 32332, 42332	160	340	68	5	541 000	497 000	1600
2336, 32336, 42336	180	380	75	5	764 000	724 000	1250
2340, 32340, 42340	200	420	80	6	860 000	818 000	1250
<i>Средняя широкая серия</i>							
2605, 32605, 42605	25	62	24	2	36 700	27 800	8000
2606, 32606, 42606	30	72	27	2	40 900	30 600	8000
2607, 32607, 42607	35	80	31	2,5	45 800	34 200	6300
2608, 32608, 42608	40	90	33	2,5	59 900	46 600	6300
2609, 32609, 42609	45	100	36	2,5	77 700	61 500	6300
2610, 32610, 42610	50	110	40	3	102 000	85 500	5000
2611, 32611, 42611	55	120	43	3	113 000	92 500	5000
2612, 32612, 42612	60	130	46	3,5	137 000	116 000	4000
2613, 32613, 42613	65	140	48	3,5	149 000	126 000	4000
2615, 32615, 42615	75	160	55	3,5	208 000	183 000	3150
2616, 32616, 42616	80	170	58	3,5	220 000	198 000	3150
2617, 32617, 42617	85	180	60	4	254 000	230 000	3150
2618, 32618, 42618	90	190	64	4	265 000	240 000	2500
2620, 32620, 42620	100	215	73	4	356 000	336 000	2500
2622, 32622, 42622	110	240	80	4	364 000	450 000	2000
2624, 32624, 42624	120	260	86	4	548 000	532 000	2000
2626, 32626, 42626	130	280	93	5	650 000	650 000	2000
2630, 32630, 42630	150	320	108	5	753 000	757 000	1600
2634, 32634, 42634	170	360	120	5	1040 000	1080 000	1250
<i>Тяжелая серия</i>							
2410, 32410, 42410	50	130	31	3,5	100 000	75 000	4000
2411, 32411, 42411	55	140	33	3,5	108 000	82 000	4000
2412, 32412, 42412	60	150	35	3,5	121 000	101 000	4000
2413, 32413, 42413	65	160	37	3,5	143 000	112 000	3150
2414, 32414, 42414	70	180	42	4	183 000	147 000	3150
2415, 32415, 42415	75	190	45	4	212 000	173 000	3150
2416, 32416, 42416	80	200	48	4	244 000	200 000	2500
2417, 32417, 42417	85	210	52	5	266 000	221 000	2500
2418, 32418, 42418	90	225	54	5	300 000	252 000	2500
2419, 32419, 42419	95	240	55	5	320 000	273 000	2500
2420, 32420, 42420	100	250	58	5	360 000	310 000	2000
2421, 32421, 42421	105	260	60	5	400 000	345 000	2000
2422, 32422, 42422	110	280	65	5	445 000	388 000	2000
2424, 32424, 42424	120	310	72	6	557 000	500 000	2000
2426, 32426, 42426	130	340	78	6	670 000	605 000	1250
2428, 32428, 42428	140	360	82	6	725 000	655 000	1250

Таблица П5.3. Подшипники шариковые радиальные однорядные с двумя уплотнениями по ГОСТ 8882-75

Условное обозначение подшипника	<i>d</i> , мм	<i>D</i> , мм	<i>B</i> , мм	<i>r</i> , мм	<i>C</i> , Н	<i>C</i> ₀ , Н	<i>n</i> , об/мин
180500	10	30	14	1	4590	2670	8000
180501	12	32	14	1	4690	2670	8000
180502	15	35	14	1	5220	3030	6300
180503	17	40	16	1	7360	4410	6300
180504	20	47	18	1,5	8220	5000	5000
180505	25	52	18	1,5	10 800	6950	4000
180506	30	62	20	1,5	11 600	7740	4000
180508	40	80	23	2	23 200	17 750	3150
180509	45	85	23	2	24 100	17 850	3150
180602	15	42	17	1,5	8750	5410	8000
180603	17	47	19	1,5	10 700	6680	8000

Приложение 6

ШКАЛА МОЩНОСТЕЙ, ВЫСОТЫ ОСЕЙ ВРАЩЕНИЯ И УСТАНОВОЧНЫЕ РАЗМЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**Таблица Пб.1. Шкала мощностей, кВт, по ГОСТ 12139-84
(в диапазоне от 0,06 до 1000 кВт)**

0,06	0,55	4	22	90	315
0,09	0,75	5,5	30	110	400
0,12	1,1	7,5	37	132	500
0,18	1,5	11	45	160	630
0,25	2,2	15	55	200	800
0,37	3	18,5	75	250	1000

Таблица Пб.2. Высоты оси вращения (ГОСТ 13267-73)

За высоту оси вращения принимается расстояние от оси вращения до опорной плоскости машины, измеренное в середине выступающего конца вала.

Номинальные значения высот оси вращения должны соответствовать ряду 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900 и 1000 мм.

П р и м е ч а н и я: 1. В технически обоснованных случаях допускается применение высот оси вращения 125, 140 и 236 мм и для машин, разрабатываемых на базе существующих серий, также высоты оси вращения 600 мм.

2. Указанные значения высот оси вращения распространяются на все конструктивные формы вновь разрабатываемых и модернизируемых (в части установочных размеров) электрических машин общего назначения и специального назначения с горизонтальной осью вращения.

3. Отклонения от номинальной высоты оси вращения относительно опорной плоскости машины должны соответствовать ГОСТ 8592-79 для электрических машин и непосредственно соединяемых с ними неэлектрических машин, кроме неэлектрических двигателей.

Таблица Пб.3. Высоты оси вращения и связанные с ними установочные размеры, мм, электрических машин по ГОСТ 13267-73, ГОСТ 18709-73 и ГОСТ 208839-75 (см. рис. 10.2)

<i>h</i>		<i>b</i> ₁₀	Условное обозначе- ние дли- ны сер- дечника	<i>l</i> ₁₀	<i>l</i> ₃₁	<i>d</i> ₁₀
Номиналь- ное зна- чение	Допуск					
Высоты оси вращения от 56 до 400 мм						
56	-0,5	90	—	71	36	5,8
63	-0,5	100	—	80	40	7
71	-0,5	112	—	90	45	7
80	0,5	125	—	100	50	10
90	-0,5	140	S L	100 125	56	10
100	-0,5	160	S L	112 140	63	12
112	-0,5	190	S M L	114 140 159	70	12
132	-0,5	216	S M L	140 178 203	89	12
160	-0,5	254	S M L	178 210 254	108	15
180	-0,5	279	S M L	203 241 279	121	15
200	-0,5	318	S M L	228 267 305	133	19
225	-0,5	356	S M L	286 311 356	149	19

Продолжение табл. Пб.3

Номиналь- ное зна- чение	<i>h</i>		Условное обозначе- ние дли- ны сер- дечника	<i>l</i> ₁₀	<i>l</i> ₃₁	<i>d</i> ₁₀
	Допуск	<i>b</i> ₁₀				
250	-0,5	404	S M L	311 349 406	168	24
280	-1	457	S M L	368 419 457	190	24
315	-1	508	S M L	406 457 508	216	28
355	-1	610	S M L	500 560 630	254	28
400	-1	686	S M L — —	560 630 710 800 900	280	35
Высоты оси вращения от 450 до 630 мм						
450	-1	710, 800, 900, 1000, 1120	—	355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1120, 1250	—	35
500	-1	800, 900, 1000, 1120, 1250	—	400, 450, 500, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400	—	42
560	-1	900, 1000, 1120, 1250, 1400	—	450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400	—	42

Номиналь- ное зна- чение	<i>h</i>		Условное обозначе- ние дли- ны сер- дечника	l_{10}	l_{31}	d_{10}
	Допуск	b_{10}				
630	-1	1000, 1120, 1250, 1400, 1600	—	500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1600	—	48

П р и м е ч а н и е. Для двигателей с высотами оси вращения от 450 до 630 мм размеры l_{31} следует выбирать из ряда 100, 200, 224, 250, 280, 315, 335, 355, 375, 400, 425, 450, 475, 500, 530, 560, 600, 630, 670, 710, 750, 800, 900, 1000 мм независимо от высоты вращения.

Таблица Пб.4. Размеры выступающего конца вала электрических двигателей по ГОСТ 187709-73 и ГОСТ 20839-75 (см. рис. 10.2)

d_1 , мм	l_1 , мм	Наибольший момент вра- щения, Н·м	d_1 , мм	l_1 , мм	Наибольший момент вра- щения, Н·м
7	16	0,25	75	140	1000
9	20	0,63	80	170	1250
11	23	1,25	85	170	1600
14	30	2,8	90	170	1900
16	40	4,5	95	170	2360
18	40	7,1	100	210	2800
19	40	8,25	110	210	4000
22	50	14	120	210	—
24	50	18	126	210	—
28	60	31,5	130	250	—
32	80	50	140	250	—
38	80	90	150	250	—
42	110	125	160	300	—
48	110	200	170	300	—
55	110	355	180	300	—
60	140	450	190	350	—
65	140	630	200	350	—
70	140	800	220	350	—

П р и м е ч а н и е. Значение наибольшего момента вращения при номинальном режиме работы машины — по данным публикации МЭК-72.

Таблица Пб.5. Размеры, мм, крепежных фланцев по данным публикации МЭК-72 (см. рис. 10.2)

Диаметры фланца			Отверстия для болтов		
d_{20}	d_{25}	d_{24}	Число отвер- стий n	Диаметр d_{22} , мм	
				гладкий	резьбовой
55	40	70	4	5,8	M5
65	50	80	4	5,8	M5
75	60	90	4	5,8	M5
85	70	105	4	7	M6
100	80	120	4	7	M6
115	95	140	4	10	M8
130	110	160	4	10	M8
165	130	200	4	12	M10
215	160	250	4	15	M12
265	230	300	4	16	M12
300	250	350	4	19	M16
350	300	400	4	19	M16
400	350	450	8	19	M16
500	450	550	8	19	M16
600	550	660	8	24	M20
740	680	800	8	24	M24
940	880	1000	8	28	M24
1080	1000	1150	8	28	M24

Приложение 7

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ

Условное обозначение степени защиты электротехнических изделий, обеспечиваемых их оболочками, состоит из двух букв латинского алфавита — IP (начальные буквы слов International Protection) и двух цифр.

Первая цифра (от 1 до 6) обозначает степень защиты персонала от соприкосновения с находящимися под напряжением и вращающимися частями, расположенными внутри оболочки электротехнического изделия, а также от попадания внутрь оболочки твердых посторонних предметов (табл. П7.1).

Вторая цифра (от 1 до 8) обозначает степень защиты изделия от попадания воды внутрь его оболочки (табл. П7.2).

Электрические машины выпускаются со степенями защиты, обозначение которых приведено в табл. П 7.3.

Если требуется указать степень защиты изделия только одной цифрой условного обозначения, то пропущенная цифра замещается буквой "X", например, IPX4, IP3X.

Таблица П7.1. Степени защиты, определяемые первой цифрой в условном обозначении

Первая цифра	Степень защиты
0	Специальная защита отсутствует
1	Защита от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела, например, руки, и от проникновения твердых тел размером свыше 50 мм
2	Защита от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной не более 80 мм и от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм
3	Защита от проникновения внутрь оболочки инструментов, проволоки и т.д. диаметром или толщиной более 2,5 мм и от проникновения твердых тел размером более 2,5 мм
4	Защита от проникновения внутрь оболочки проволоки и от проникновения твердых тел размером более 1,0 мм
5	Проникновение внутрь оболочки пыли не предотвращено полностью, однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделия
6	Проникновение пыли предотвращено полностью.

Таблица П7.2. Степени защиты, определяемые второй цифрой условного обозначения

Вторая цифра	Степень защиты
0	Специальная защита отсутствует
1	Защита от капель воды: капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие
2	Защита от капель воды: капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие при наклоне его оболочки на любой угол до 15° относительно нормального положения
3	Защита от дождя: вода в виде дождя, падающая на оболочку под углом до 60° от вертикали, не должна оказывать вредного действия на изделие
4	Защита от брызг: вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного действия на изделие.
5	Защита от водяных струй: струя воды, выбрасываемая в любом направлении на оболочку, не должна оказывать вредного действия на изделие
6	Защита от волн воды: вода при волнении не должна попадать внутрь оболочки в количестве, достаточном для повреждения изделия
7	Защита при погружении в воду: вода не должна проникать в оболочку, погруженную в воду, при определенных условиях давления и времени в количестве, достаточном для повреждения изделия
8	Защита при длительном погружении в воду: изделия пригодны для длительного погружения в воду при условиях, установленных изготовителем (для некоторых типов изделий допускается проникновение воды внутрь оболочки, но без нанесения вреда изделию)

Таблица П7.3. Условное обозначение степени защиты электрических машин

Первая цифра обозначения ¹	Вторая цифра обозначения ²								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	IP00	IP01	—	—	—	—	—	—	—
1	IP10	IP11	IP12	IP13	—	—	—	—	—
2	IP20	IP21	IP22	IP23	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	IP43	IP44	—	—	—
5	—	—	—	—	IP54	IP55	IP56	IP57	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—

1. См. табл. П7.1.

2. См. табл. П7.2.

Приложение 8

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ СПОСОБОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Условное обозначение способов охлаждения электрических машин содержит две буквы латинского алфавита — IC (начальные буквы слов International Cooling) и следующие за ними характеристики цепей охлаждения. Каждая характеристика в свою очередь состоит из буквы латинского алфавита и двух цифр.

Буквы обозначают вид хладагента, используемого в данной цепи: воздух — A, водород — H, азот — N, фреон — F, вода — W, диоксид углерода — C, масло — V, керосин — K. Если в качестве хладагента используются другие, не переименованные газы или жидкости, то в обозначении приводят их полное наименование.

В цифровой части обозначения первая цифра условно обозначает устройство для циркуляции хладагента (табл. П8.1); вторая — способ перемещения хладагента (табл. П8.2).

Если машина имеет две или более цепи охлаждения, как например обдуваемые двигателя исполнения IP44 или машины с замкнутой системой охлаждения при наличии охладителей, то в обозначении указывают характеристики каждой из цепей, начиная с цепи со вторичным, т. е. имеющим более низкую температуру, хладагентом.

В целях упрощения обозначений допускается для наиболее распространенных систем воздушного охлаждения в условном обозначении опускать букву A; если способом перемещения хладагента является самовентиляция, то в обозначении допускается сохранять только первую цифру, характеризующую устройство цепи охлаждения, например обозначать IC0 вместо IC01, как при полном обозначении.

Примеры условных обозначений систем охлаждения электрических машин приведены в табл. П8.3.

Таблица П8.1. Условное обозначение цепи циркуляции хладагента (первая цифра в условном обозначении системы охлаждения)

Цифра	Краткая характеристика цепи
0	Хладагент свободно подводится из окружающей среды к машине и свободно возвращается в эту среду – свободная циркуляция
3	Хладагент подводится к машине или к охладителю не из окружающей среды, а из другого источника через подводящую трубу или подводящий канал, а затем удаляется через отводящую трубу или отводящий канал на некоторое расстояние от машины – охлаждение при помощи подводящей и отводящей труб или каналов
4	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло через поверхность корпуса вторичному хладагенту, которым является среда, окружающая корпус машины. Поверхность корпуса машины может быть гладкой или ребристой для лучшей теплопередачи – охлаждение внешней поверхности машины.
7	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло вторичному хладагенту в охладителе, встроенном в машину и являющемся ее неотъемлемой частью; вторичным хладагентом не является среда, окружающая машину – охлаждение при помощи встроенного охладителя, без использования окружающей среды
8	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло вторичному хладагенту в охладителе, являющемся независимым устройством, установленном непосредственно на машине; вторичным хладагентом не является среда, окружающая машину – охлаждение при помощи пристроенного охладителя без использования окружающей среды

Примечание. В таблице приведены обозначения не всех видов цепей циркуляции хладагента, используемых для охлаждения электрических машин.

Таблица П8.2. Условное обозначение способа перемещения хладагента (вторая цифра в условном обозначении системы охлаждения)

Цифра	Способ перемещения хладагента
0	За счет разницы температур – свободная конвекция; вентилирующее действие ротора машины незначительно
1	Вентилирующим действием ротора или при помощи специального устройства, расположенного на валу ротора машины, – самовентиляция
2	При помощи зависимого встроенного устройства, не смонтированного непосредственно на валу машины, например внутреннего вентилятора с зубчатой передачей или ременным приводом
3	При помощи зависимого пристроенного устройства, установленного непосредственно к машине, например вентилятора, приводимого в действие электрическим двигателем, получающим питание от выводов охлаждаемой машины

- 7 При помощи отдельного устройства, не установленного на машине и не зависящего от нее, или под давлением в системе циркуляции хладагента, например путем подачи воды из водопроводной сети или газа под давлением при помощи форсунки
- 8 Посредством относительного движения машины через хладагент, например тяговый двигатель, охлаждаемый окружающим воздухом, или двигатель, приводящий в движение вентилятор и охлаждаемый основным воздушным потоком

Таблица П8.3. Примеры условных обозначений систем охлаждения электрических машин

Система охлаждения	Обозначение *
Защищенная машина с самовентиляцией; вентилятор расположен на валу машины	IC01
Защищенная машина, охлаждаемая пристроенным вентилятором; приводной электродвигатель вентилятора получает питание от выводов охлаждаемой машины	IC03
Закрытая машина с естественным охлаждением без внешнего вентилятора	IC0040
Закрытая машина с ребристой или гладкой станиной, обдуваемая внешним вентилятором, расположенным на валу машины	IC0141
Закрытая машина с подводящей и отводящей трубами; машина охлаждается вентилятором с приводным электродвигателем, не установленным на машине	IC37
Закрытая машина с воздушным охлаждением и пристроенным водяным охладителем; циркуляция воды в охладителе осуществляется отдельным насосом или от водопроводной сети	ICW37A81
Закрытая машина, имеющая обмотку статора с непосредственным водяным охлаждением; обмотка ротора охлаждается водородом; циркуляция воды в обмотке статора осуществляется отдельным насосом или от водопроводной сети; к машине пристроен воздушных охладитель	IC87 обмотка статора (W87) ротор H71

* См. табл. П8.1 и П8.2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветисян Д. А. Основы автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1988. 271 с.
2. Алексеев Ю. В., Рабинович А. А. Краново-металлургические и экскаваторные двигатели постоянного тока: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1985. 165 с.
3. Антонов М. В., Герасимова Л. С. Технология производства электрических машин. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
4. Асинхронные двигатели общего назначения/ Е. П. Бойко, Ю. В. Гайнец, Ю. М. Ковалев и др.; Под ред. В. М. Петрова и А. Э. Кравчика. М.: Энергия, 1980. 488 с.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А. Э. Кравчик, М. М. Шлоф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
6. Бериштейн Л. М. Изоляция электрических машин общего назначения. М.: Энергоиздат, 1981. 376 с.
7. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 304 с.
8. Борисенко А. И., Костиков О. Н., Яковлев А. И. Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
9. Глобов И. А., Данилевич Я. Б. Научные основы проектирования турбогенераторов. Л.: Наука, 1986. 184 с.
10. Гольдберг О. Д., Гурии Я. С., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов/ Под ред. О. Д. Гольдберга. М.: Высшая школа, 1984. 434 с.
11. Гурии Я. С., Кузнецов Б. И. Проектирование серий электрических машин. М.: Энергия, 1978. 480 с.
12. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. 928 с.
13. Кожевников В. А., Копылов И. П. Развитие теории и конструкции машин постоянного тока. Л.: Наука, 1985. 147 с.
14. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.
15. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1987. 268 с.
16. Котеленец Н. Ф., Кузнецов Н. Л. Испытания и надежность электрических машин: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1988. 232 с.
17. Курбасов А. С., Седов В. И., Сорин Л. Н. Проектирование тяговых электродвигателей: Учеб. пособие для вузов/ Под ред. А. С. Курбасова. М.: Транспорт, 1987. 536 с.
18. Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. М.: Высшая школа, 1980. 359 с.
19. Морозов А. Г. Расчет электрических машин постоянного тока. М.: Высшая школа, 1977. 264 с.
20. Пешков И. В. Обмоточные провода. М.: Энергоатомиздат, 1983. 350 с.

21. **Проектирование электрических машин**: Учеб. пособие для вузов/ И.П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др.; Под ред. И. П. Копылова. М.: Энергия, 1980. 496 с.

22. **Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А.** Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1969. 632 с.

23. **Справочник по электрическим машинам**. В 2-х т./ Под общ. ред. И.П. Копылова и Б. К. Клокова. Энергоатомиздат. Т. 1. 1988. 456 с., Т. 2. 1989. 688 с.

24. **Терзин А. А.** Автоматизированное проектирование электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 255 с.

25. **Хрущев В. В.** Электрические машины систем автоматики: Учебник для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 368 с.

26. **Хуторецкий Г. М., Токов М. И., Толвинская Е. В.** Проектирование турбогенераторов. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 256 с.

27. **Филиппов И. Ф.** Теплообмен в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.

28. **Электротехнический справочник**. Т. 2/ Под общей ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И. Н. Орлов). - 7-е изд., испр. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 712 с.

29. **Автоматизированное проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов**/ Ю. Б. Бородулин, В. С. Мостейкис, Г. В. Попов, В. П. Шишкин; Под ред. Ю. Б. Бородулина. М.: Высшая школа, 1989. 280 с.

30. **Орлов И. Н., Маслов С. И.** Системы автоматизированного проектирования электромеханических устройств: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 296 с.

31. **Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро**/ В.И. Радин, Й. Лондин, В. Д. Розенкноп и др.; Под ред. В. И. Радины. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.

32. **Токарев Б.Ф.** Электронные машины: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 624 с.

Предметный указатель

А

Автоматизированное рабочее место конструктора 309
Автомат чертежный 309
Активная длина коллектора 175
Активное сопротивление демпферной (пусковой) обмотки 72
-- компенсационной обмотки 160
-- обмотки возбуждения машины постоянного тока 171
-- -- возбуждения синхронной машины 69
-- -- статора синхронной машины 54
-- -- якоря машины постоянного тока 147
-- стабилизирующе обмотки 172

Б

Бандажи якоря 163, 283
Бандажные кольца обмотки статора 226
Банк данных 312

В

Валы электрических машин 231
Векторная диаграмма синхронной машины 56
Витки обмотки возбуждения машины постоянного тока 171
-- синхронной машины 66
-- якоря машины постоянного тока 142
-- фазы статора синхронной машины 36
Возбудительное устройство синхронной машины 59
Воздушный зазор машины постоянного тока 151
-- синхронной машины 37
Выбор марки щеток 175

Г

Главные полюсы машин постоянного тока 164, 169, 252

Главные размеры машин постоянного тока 137
-- синхронных машин 18

Д

Демпферная (пусковая) обмотка синхронной машины 42
Диаметр статора синхронной машины 18, 21
-- якоря машины постоянного тока 137
Добавочные полюсы машины постоянного тока 175, 253

З

Зубцовое деление статора синхронной машины 26
-- якоря машины постоянного тока 141

И

Изоляция обмоток возбуждения синхронной машины 62-64
-- главных полюсов 125
-- добавочных полюсов 125
-- компенсационных 156
-- статора синхронных машин 32
Индуктивное сопротивление обмоток синхронной машины 54, 69
Индукция в воздушном зазоре машины постоянного тока 137, 151
-- -- синхронной машины 23

К

Клинья пазовые 286
Коллекторы с креплением пластин нажимными конусными фланцами 291
-- -- конструкционной пластмассой 295
Контактные кольца 298

Концы валов 232
 Коэффициент воздушного зазора 46, 163
 — запаса возбуждения синхронных машин 69
 — заполнения магнитопроводов сталью 34, 41
 — паза 35
 — магнитной проводимости рассеяния статора 55
 — обмоточный 37
 — полезного действия машин постоянного тока 138
 — — синхронных машин 77
 — формы поля синхронной машины 45
 Критическая частота вращения 238

Л

Линейная нагрузка машин постоянного тока 140, 143
 — — синхронных машин 23
 Лобовые части обмотки якоря машины постоянного тока (длина) 150
 — — — синхронной машины 54

М

Магнитная цепь машины постоянного тока 160
 — — синхронной машины 44
 Магнитное напряжение воздушного зазора 46, 165
 — — — стальных частей 46, 165
 Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения машин постоянного тока 168
 — — — синхронных машин 75
 Масса активных материалов синхронных машин 75
 Мощность расчетная 18, 138
 — номинальная 78, 136

Н

Нормальная характеристика холостого хода 51

О

Обмотки возбуждения машины постоянного тока 169
 — — синхронных машин 59
 — демпферные (пусковые) 42
 — компенсационные 152

Обмотки стабилизирующие 172
 — добавочных полюсов 175
 — якоря машин постоянного тока 141
 — — синхронных машин 25
 Обеспечение программное 305
 — лингвистическое 305
 — методическое 305
 — организационное 305
 Обод (остов) ротора синхронной машины 41
 Операционная система 310
 Отношение короткого замыкания 84

П

Паз статора синхронной машины 31
 — якоря машины постоянного тока 141
 Пальцы траверсы 302
 Пакет прикладных программ 320
 Параллельные ветви обмотки якоря 26
 Параметры синхронных машин 69
 Перепад температуры в изоляции паза 34
 Плотность тока в обмотке возбуждения машины постоянного тока 171
 — — — синхронной машины 66
 — — в обмотке статора синхронной машины 31
 — — — якоря машины постоянного тока 143
 Подшипники качения 244
 — скольжения 248
 Подшипниковые щиты 243
 Постоянные времени синхронных машин 73
 Потери в машинах постоянного тока
 — в синхронных машинах 77
 Пусковые характеристики синхронного двигателя 84

Р

Распорки межполюсные 262
 Расчет двигателя (пример) постоянного тока 194
 — — синхронного 86
 Расчет дискового ротора синхронной машины 271
 — ротора синхронной машины в виде магнитного колеса 273
 — (механический) магнитопроводов роторов асинхронных двигателей и якорей машин 278
 — — бандажей и клиньев роторов 283

С

Сегментировка статора 28
Система автоматизированного проектирования электрических машин 303
— — — асинхронных двигателей 313
— — — крупных электрических машин 315
— — — специальных электрических машин 316
Станины электрических машин 228
Статическая перегруженность синхронных машин 82

Т

Температурный перепад в изоляции 34
Тепловой расчет машин постоянного тока 184
— — синхронных машин 68, 79
Терминал 307
Траверса 302

У

Угловые характеристики синхронных машин 81
Ударный ток короткого замыкания синхронных машин 83

Х

Характеристика намагничивания машины постоянного тока 169
— холостого хода синхронной машины 51
Характеристики рабочие двигателей постоянного тока 183
— — синхронных двигателей 82
— — синхронных генераторов 80

Ш

Шкала мощностей синхронных генераторов 6
— — синхронных двигателей 4

Щ

Щетки 301
Щеткодержатели 301
Щиты подшипниковые 243

Э

Электродвижущая сила реактивная 173
Электромагнитные нагрузки машин постоянного тока 140

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава девятая. Проектирование синхронных машин.	3
9.1. Общие сведения	3
9.2. Конструкция серийных синхронных машин общего назначения	7
9.3. Система отчисительных единиц	17
9.4. Задание на проектирование	17
9.5. Выбор главных размеров	18
9.6. Обмотка и зубцовая зона статора	25
9.7. Сегментировка статора	28
9.8. Пазы, обмотка и ярмо статора	31
а) Размеры пазов статора	31
б) Обмотка статора	36
9.9. Воздушный зазор и полюсы ротора	37
9.10. Расчет демпферной (пусковой) обмотки	42
9.11. Расчет магнитной цепи	44
9.12. Определение МДС реакции якоря	51
9.13. Параметры обмотки статора для установившегося режима работы	54
9.14. Определение МДС обмотки возбуждения при нагрузке. Векторные диаграммы	56
9.15. Расчет обмотки возбуждения	59
9.16. Параметры и постоянные времени	69
9.17. Масса активных материалов	75
9.18. Потери и КПД	77
9.19. Тепловой расчет обмотки статора для установившегося режима работы	79
9.20. Характеристики синхронных машин	80
а) Основные характеристики	80
б) Токи короткого замыкания	83
в) Пусковые характеристики	84
Пример расчета трехфазного синхронного двигателя	86
Контрольные вопросы	119
Глава десятая. Проектирование машин постоянного тока	120
10.1. Серии машин постоянного тока	120
10.2. Задание на проектирование машины постоянного тока	136
10.3. Выбор главных размеров	137
10.4. Расчет обмотки и пазов якоря	141
10.5. Расчет воздушного зазора под главными полюсами. Компенсационная обмотка	151
10.6. Расчет магнитной цепи	160
10.7. Расчет обмотки возбуждения	169
10.8. Расчет коммутации	172
10.9. Расчет добавочных полюсов	175
10.10. Потери и КПД. Рабочие характеристики	180
10.11. Особенности теплового и вентиляционного расчетов машин постоянного тока	184
Пример расчета двигателя постоянного тока	194

Заключение.	220
Контрольные вопросы	221
<i>Глава одиннадцатая. Элементы конструкции и механические расчеты.</i>	<i>221</i>
11.1. Магнитопровод статора	221
11.2. Статоры	228
11.3. Валы	231
11.4. Подшипники. Подшипниковые щиты.	243
11.5. Полусы	252
11.6. Механический расчет магнитопровода ротора синхронной машины	270
а) Расчет дискового ротора	271
б) Расчет ротора в виде магнитного копеса	273
11.7. Ротеры асинхронных двигателей и якоря машины постоянного тока	276
а) Механический расчет магнитопровода.	278
б) Расчет бандажей и клиньев.	283
11.8. Коллекторы	287
а) Механический расчет коллектора с нажимными конусными	
фланцами	291
б) Механический расчет коллектора на пластмассе	295
11.9. Контактные кольца	298
11.10. Токоъемный аппарат	301
Контрольные вопросы	303
<i>Глава двенадцатая. Системы автоматизированного проектирования электри-</i>	<i>303</i>
<i>ческих машин</i>	<i>303</i>
Контрольные вопросы	321
Приложение 1. Кривые намагничивания сталей.	321
Приложение 2. Кривые намагничивания для зубцовых зон с учетом ответвле-	
ния потока в пазы.	338
Приложение 3. Обмоточные провода, ленты и шины.	343
Приложение 4. Щетки для электрических машин.	360
Приложение 5. Подшипники качения	363
Приложение 6. Шкала мощностей, высоты осей вращения и установочные	
размеры электрических машин.	368
Приложение 7. Условное обозначение исполнения электрических машин	
по степени защиты	372
Приложение 8. Условное обозначение способов охлаждения электричес-	
ких машин	374
Список литературы	377
Предметный указатель.	379

Учебное издание

Копылов Игорь Петрович
Клюков Борис Константинович
Морозкин Виктор Павлович
Токарев Борис Федорович

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Книга 2 *1.256 руб*

Зав. редакцией *М. П. Соколова*
Редактор *И. Ф. Милешина*
Художественные редакторы *А. А. Белоус, В. А. Гозак-Хозак*
Технические редакторы *Н.М. Брудная, М.А. Канониди*
Корректор *С.В. Малышева*
ИБ № 2611

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинал-макета 25.02.93.
Формат 60х90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 24,0. Усл. кр.-отт. 24,25.
Уч.-изд. л. 26,77. Тираж 5000 экз. Заказ № 934. С 061.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Школьная наб., 10.

Отпечатано в Московской типографии № 6 Министерства печати
и информации Российской Федерации,
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.